"十二五"国家重点出版物出版规划项目

Intelligent Combat Robots

智能作战机器人

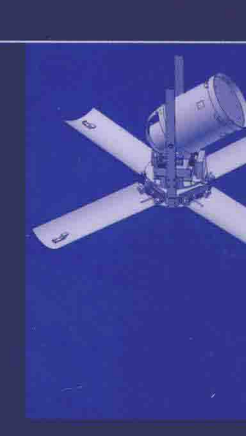


罗庆生　韩宝玲　罗　霄　著

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

策划编辑：樊红亮　李炳泉
执行编辑：靳　媛
封面设计：水晶方装帧设计

Intelligent Combat Robots




ISBN 978-7-5640-8365-6
定价：68.00元

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

智能作战机器人

Intelligent Combat Robots

罗庆生　韩宝玲　罗　霄　著

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

智能作战机器人是由现代设计理论、现代制造技术、现代电子技术、现代控制技术、现代信息技术和现代材料技术等多学科、多领域、多技术有机融合的现代智能武器系统。本书主创人员经过数年的系统研究和科学探索，在智能作战机器人核心功能和关键技术方面取得了一系列突破。本书的编写立足于智能作战机器人相关基础理论知识与实际应用技术的无缝连接与有机结合，所涉及的技术均为当今业界的前沿和高新技术；汇集了相关技术领域最新的研究成果，具有先进性和实用性。无论是在理论学习，还是在技术推广，或是在经验借鉴方面，都可为广大读者提供帮助。本书可作为普通高等院校机械类、控制类、信息类等相关专业的本科生和研究生教材，也适合作为从事机械、控制、信息、探测、图像处理以及机器人技术研究和应用的科研人员的学习参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

智能作战机器人／罗庆生，韩宝玲，罗霄著．—北京：北京理工大学出版社，2013.11

ISBN 978－7－5640－8365－6

Ⅰ．①智…　Ⅱ．①罗…②韩…③罗…　Ⅲ．①智能机器人－研究　Ⅳ．①TP242.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 229225 号

出版发行／北京理工大学出版社有限责任公司
社　　址／北京市海淀区中关村南大街 5 号
邮　　编／100081
电　　话／（010）68914775（总编室）
82562903（教材售后服务热线）
68948351（其他图书服务热线）
网　　址／http：//www.bitpress.com.cn
经　　销／全国各地新华书店
印　　刷／北京地大天成印务有限公司
开　　本／787 毫米×1092 毫米　1/16
印　　张／16.25
字　　数／318 千字
版　　次／2013 年 11 月第 1 版　2013 年 11 月第 1 次印刷
定　　价／68.00 元

责任编辑／王玲玲
文案编辑／王玲玲
责任校对／周瑞红
责任印制／马振武

序　言

无论是在过去、现在还是在未来的战争中，“保持战力于地下，发挥火力于地上”是一种基本的、关键的战场建设原则。多年来，许多国家从战争学习战争，深入研究和系统探索保存己方军事实力的方法与手段，纷纷将飞机、坦克、火炮等重要军事装备从在露天基地里停放改为在山体洞库中隐藏。洞库，作为一种特殊的建筑结构形式，是战争中存放军用物资、建立防御工事、隐藏战略武器的绝佳之地，在古往今来的战争中得到了广泛的应用。现代的各种军用洞库，大多是在战略要地经人工开凿而成的，由于其顶部覆有坚硬的岩石山体和深厚土层，通常可抵挡普通导弹的直接命中，对钻地弹，甚至核爆，都有足够的抗御能力。军用洞库普遍还具备防洪、排水功能，内部拥有完整的电力、供水、消防、通信、医疗、空调系统，各出口设有防护钢门，可抗震、防爆和防核、生物、化学武器的侵袭，成为一些国家隐藏军事装备、躲避敌方打击、提供反制手段、保持还击实力的有效堡垒。

随着我国综合国力和国际影响力的日益增强，敌对势力亡我之心更加迫切。严峻的形势表明，敌对势力必定会凭借其苦心经营的各种洞库，隐藏武器装备、重要设施和军事人员，与我长期周旋。为提升针对反分裂、反霸权和反恐怖斗争中的打击能力，在传统的弹药难以对洞库类目标实施有效打击的情况下，发展能多途径投放、大面积抛撒、自主寻的、自动摧毁目标的反洞库智能作战机器人，已成为各国发展具有反洞库目标突出效果的先进武器与装备热点之一。

应当看到，具有反洞库目标打击能力的智能作战机器人可以在当前和今后的“洞库战”中发挥重大作用，该机器人装备着多模复合探测器、弹载实时控制器和高效火箭推进器，可以通过增程大口径火箭炮、炮兵地对地战术导弹或飞机进行投放，降落到地面后能够自动采集周围环境的图像信息，自动发现、自主识别、自行攻击洞库目标，摧毁洞库内的飞机、坦克、火炮等武器装备和作战人员，还可以封锁、围堵敌方洞库，有效

遏制敌机或物资的进出流动。由于智能作战机器人打击的范围广、精度高、效果好，且便于大量撒布，能够有效打击洞库目标，倍增军队的战斗力和威慑力，因而对其开展深入的理论研究和系统的技术探索是十分必要的。

在新的作战理论、作战模式和作战需求的不断催化和持续推进下，武器系统已经发展成为由现代设计理论、现代制造技术、现代电子技术、现代控制技术、现代信息技术和现代材料技术等多学科、多领域、多技术有机融合的具有自主探测、搜索、识别、选择、发火、攻击的现代智能武器系统。与此相符，本书所述的智能作战机器人就是这种现代智能武器系统，它包含结构子系统、探测子系统、驱动子系统、控制子系统和毁伤子系统等五大系统，集成瓣体设计、投放撒布、着地缓冲、快速解脱、弹体扶正、图像探测、目标识别、芯片控制、弹体瞄准、火箭助推、重心稳定、适时起爆等技术，是一种新概念的光机电一体化武器装备，是当代多种高新技术的综合产物，在推动我军特种装备技术发展、提升我军未来战争实际战力、促进我国相关民用产品技术进步等方面具有重要作用。

本书的主创人员经过数年的系统研究和探索，在智能作战机器人核心功能与关键技术方面取得了一系列突破，并将其主要成果修撰成书。该书共分 5 章，第 1 章绪论，第 2 章智能作战机器人系统结构设计技术，第 3 章智能作战机器人联合控制技术，第 4 章智能作战机器人图像采集和目标识别技术，第 5 章智能作战机器人系统相关辅助技术。该书所涉及的技术均为当今业界的前沿和高新技术，所论及的问题均为当今业界的热点和难点问题。全书汇集了相关技术领域最新的研究成果，无论是在理论学习，还是在技术推广，或是在经验借鉴方面都可为广大读者提供帮助。本书题裁新颖、内容充实、写作严谨、论证严密、语言流畅、图文并茂，可读性和适用性俱佳，拥有广阔的读者市场。

2013 年 9 月于北京

前　　言

天体运行、星移斗转；四季变换、日月往复；万物繁衍、生生不息。自然界的客观发展，本无所谓设计可言，但自从万物之灵的人类诞生以来，人类为了在险恶的自然环境中，以及与其他物种的强烈竞争中，取得生活之源和生存之本，不断适应、改造、完善自然界和人类社会本身，从而萌发了建设各种物质文明和精神文明的一些有目的、有意识、有组织、有计划的活动。这种活动就是“设计”。从设计的本质和内涵来分析，人类早期兽皮御寒、树叶遮羞，构木为巢、结绳记事包含“设计”；而制工具、造房屋、兴水利、办冶金也包含“设计”。人类历经“石器”时代、“青铜器”时代以及“铁器”时代的事实表明，人类的“设计”水平随着人类的成长和发展而提高。中国的万里长城、埃及的金字塔、巴比伦的空中花园和罗马的斗兽场是古代人类“设计”的光辉典范，闪耀着人类智慧的光芒。由此可见，人类经过数十万年的物质生产活动创造了当今无限美妙的物质世界；此外，人类创语言、造文字、兴宗教、建国家也是一种“设计”。文学、艺术、体育、政治、军事、经济、外交、法律都需要“设计”；东西南北中、工农兵学商都离不开“设计”。由封建主义到资本主义以及由空想社会主义到科学社会主义，更是一种在跨度上和深度上无与伦比的伟大“设计”。人类同样经过数十万年的社会实践活动创造了当今无限美妙的精神世界。古今中外的历史证明，人类文明的源泉是创新，人类生活的本质也是创新，而设计，其实质就是充满创新性的思维和活动。在人类已经高视阔步进入知识经济时代和网络信息社会的今天，为了使精神文明建设和物质文明建设同步发展，人们不但需要将设计提升为创新设计，更需要通过创新实践将创新设计的有关目标予以实现。从某种意义上说，创新设计为人类勾画出发明创造的美好蓝图，而创新实践则将这种美好蓝图变为发明创造的美好现实。

本书是北京理工大学“特种机器人技术创新团队”在多年的理论与实践过程中，经过创新性设计、创新性探索、创新性实践所获精华的浓缩、成果的集萃，代表着该团队在“智能作战机器人”设计与研究方面的水平与能力。北京理工大学“特种机器人技术创新团队”成立于2005年，主要从事军用机器人、工业机器人、机电伺服控制技术、

机电设备测试技术、传感探测技术和机电产品创新设计等的研发工作。该团队自成立以来，在罗庆生教授、韩宝玲教授的带领下，始终坚持科研促创新、创新促科研的理念，始终扮演高新技术探索者、科研攻关冲锋队、创新项目孵化器的角色，整个团队成为一个充满创新精神、创新意识、创新才智、创新能量的先进集体。“十一五”期间，该团队经过数年的系统研究和科学探索，在智能作战机器人核心功能和关键技术方面取得了一系列突破，现将其主要成果修撰成《智能作战机器人》一书。本书共分5章，第1章为绪论，第2章为智能作战机器人系统结构设计技术，第3章为智能作战机器人联合控制技术，第4章为智能作战机器人图像采集和目标识别技术，第5章为智能作战机器人系统相关辅助技术。本书所涉及的关键技术均为当今业界的前沿和高新技术，所论及的主要问题均为当今业界的热点和难点问题。全书汇集了智能作战装备技术领域最新的研究成果，无论是在理论学习，还是在技术推广，或是在经验借鉴方面，都可为广大读者提供启发和帮助。

需要指出的是，自20世纪80年代以来，以美国为首的西方军事强国一直在积极开发各种新型智能作战装备。美国军方认为，在未来的作战中，能自动识别目标、自主控制装药爆炸，并能在最有利时机主动出击毁伤目标的智能作战装备将成为战场上的一大主力。相比而言，尽管近年来国内也积极开展了有关智能作战装备与技术的研究，但大部分只是关注国外技术进展而做的跟踪研究，到目前为止，还没有成熟的产品出现。综观国内外在智能作战装备开发研究上的现有技术成果，可知现有的这些武器、装备在打击洞库目标方面都还存在着局限和不足，因而在研制反洞库目标智能作战机器人方面还存在着巨大的发展空间。而本书所阐述的有关“智能作战机器人”的理念、技术、方法、途径会对缩小我国与国外在智能作战装备方面的差距有所助益。

在新的作战理论、作战模式和作战需求的不断催化下，武器系统已发展成为由现代设计理论、现代制造技术、现代电子技术、现代控制技术、现代信息技术和现代材料技术等多学科、多领域、多技术有机融合的具有自主探测、搜索、识别、选择、发火、攻击的现代智能武器系统。与此相符，本书所介绍的“智能作战机器人”也是这样一种现代智能武器系统，它是一种多技术的复合体，在一定程度上代表着智能作战装备技术的发展方向。让我们一起关注、期待和支持我国智能作战装备技术的发展吧！

在本书写作过程中，得到了××部相关领导的关怀，得到了北京理工大学相关部门的帮助。值本书即将付印出版之际，谨向所有关心、支持、帮助过我们的领导、专家、同事、朋友表示衷心的感谢！

作　者

2013年8月于北京

目　　录

第1章　绪　　论

1.1　智能作战机器人简况

在现代战争中，“保持战力于地下，发挥火力于地上”是一种基本的、关键的战场建设原则。第二次世界大战期间，德、日、意等法西斯国家就曾驱使大量劳工，倚山傍崖、开凿洞库，存放武器、装备等军用物资，躲避打击，负隅顽抗，令同盟国方面大费周章并付出惨痛代价。此后，洞库在战争中的重要作用日益凸显。尤其自第二次世界大战中的“珍珠港事件”之后，许多国家都吸取教训，开始将飞机、坦克、火炮等重要军事装备从在露天基地停放改为在山体洞库中隐藏。很多国家出于军事战略的考虑，在一些重要的山体地段都修筑了大大小小的洞库，其中以飞机洞库居多。这种洞库内有数百米的飞机跑道，战时洞库外只需要有几十米的跑道，飞机就可顺利起飞。一般的军事手段很难遏制住其制空权，也很难对其进行瘫痪性的军事打击。

不久前，英国皇家海军陆战队在阿富汗东部山区围剿“基地”组织成员时，发现了一个“基地”组织用来存放武器装备和作战物资的山洞群，该山洞群结构复杂，由4个相距数百米的山洞组成，每个山洞都配有坚固的金属大门，易守难攻。这一山洞群的发现表明“洞穴战”很可能会成为一种反恐作战新方式。

具有反洞库目标打击能力的智能作战机器人可以在当前和今后的“洞穴战”中发挥巨大作用，该机器人能够自动发现、自主识别、自行攻击目标洞库，摧毁洞库内的飞机、坦克、火炮等武器装备和作战人员，还可以封锁、围堵目标洞库，有效遏制飞机或物资的进出流动。这种机器人可以通过多种运载工具或技术手段进行投放，降落到地面后能够自动采集周围环境的图像信息，经采样、识别，发现洞库类目标后，可自主对目标发起攻击。智能作战机器人还可自动进入巡狩状态，对洞库进行封锁，让洞库中的武器装备发挥不出战力。

智能作战机器人装备有多模复合探测器、弹载实时控制器和高效火箭推进器，打击的范围广、精度高、效果好，且便于大量撒布，能够有效打击敌军的洞库目标，倍增己方士兵的战斗力和威慑力。

1.2 智能作战机器人研究的现状及发展趋势

1.2.1 国外研究的现状及发展趋势

自20世纪80年代以来，以美国为首的西方军事强国一直在积极开发各种新型智能机器人。美军方认为，在未来的作战中，能自动识别目标、自主控制炸药爆炸，并能在最有利时机主动出击、毁伤目标的智能地雷将成为战场上的一大主力。在美国目前研制的各型智能地雷中，最为典型的有两种：一种是自主机动式地雷，它可以自空中投送，自动实施快速攻击，并能够长时间地自动探测目标，当它锁定目标后，助推火箭会自行点火，并在控制系统引导下自动腾空攻击目标，如在预定时间内没有发现目标和实施攻击，它还会根据需要自行爆炸销毁。另一种是自寻的地雷（如图1.1所示法国“玛扎克”声控增程反坦克地雷和图1.2所示美国M93“黄蜂”广域地雷），其典型代表是“赫尔卡斯”智能地雷。该地雷装有遥感、微型计算机和火箭装置，在隐蔽地域设置好后，就会自动监视周围情况，一旦有目标进入其警戒圈，它就会自动腾空飞起，追踪目标，直至将其击中。据称，1颗自寻的智能地雷可以封锁约20 000 m^2 的范围。

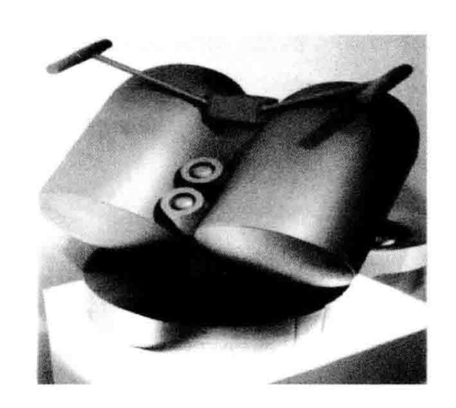
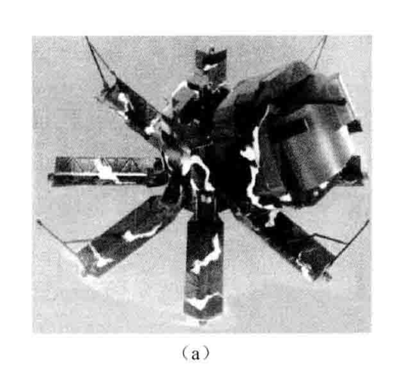


图1.1 法国“玛扎克”声控增程反坦克地雷



图1.2 美国M93“黄蜂”广域地雷

图1.3所示为美、英联合研制的AHM系列反直升机地雷。该地雷在布设后处于休眠状态，只有声探测系统处于值班状态。当直升机飞行时，其主旋翼和发动机会发出具有一定特征的声音，当地雷声频识别系统探测到这种声音后，会立即进行判断，如确认是己方直升机，地雷起爆系统就继续处于休眠状态；一旦确认是敌方直升机，声频识别系统就立即唤醒地雷，使之进入战斗状态。此时，红外探测起爆系统开始工作，以探测目标是否进入了攻击区，当发现敌方直升机已进入地雷防区时，立即自行点火，并迅速腾升至100 m左右的高度起爆，将直升机击毁。


(a)

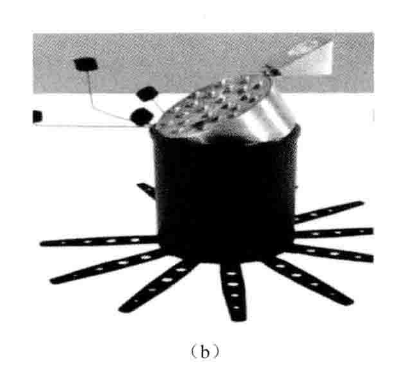

(b)

图1.3　美、英AHM系列反直升机地雷

1.2.2　国内研究的现状及发展趋势

近年来，国内也积极开展了有关智能机器人技术的研究，但大部分只是关注国外技术而做的跟踪研究，到目前为止，还没有成熟的产品出现。

从“八五”末期开始，国内就开始了反坦克导弹、反坦克火箭弹、末敏弹等制导机器人的研究。虽然这些研究内容还不完全等同于国外智能机器人的概念和技术，但是其相关技术可以为研制智能机器人提供一定的支持和借鉴作用。

中国××集团某研究所自“八五”以来，结合炮射末敏弹的研究课题，一直在进行毫米波传感器的研制工作，完成了大量的毫米波辐射特性测试研究，建立了相关测试系统、缩比模拟塔和传感器模拟装置，为探测识别金属装甲目标做了大量的研究工作，同时进行了毫米波探测直升机的前瞻性研究，完成了超低空飞行和悬停直升机的探测试验，积累了大量数据，具有一定的技术贮备。

我国某大学在“八五”期间承担了“直升机噪声特性研究”、“直升机和坦克目标探测技术”、“机动目标的声探测技术”和“近炸引信目标探测和识别”等基金课题，尤其是在对目标噪声特性、目标识别定位方面，已经做了较为深入的研究并取得了阶段性的成果。

总体上，国内智能机器人技术因起步较晚，投入较少，与国外先进水平相比存在着较大差距，特别是在反洞库目标智能机器人的研究方面还几乎是空白。综观国内外在智能机器人开发研究上的现有技术成果，可知现有的武器、装备在打击洞库目标方面还存在着局限和不足，在反洞库目标智能机器人研究方面还有着很大的发展空间。

1.3 智能作战机器人研究的主要内容

未来的战争仍是一种在有限地域内对有限目标采用有限手段达到有限目的的局部战争。洞库，作为一种特殊的建筑结构形式，在当今世界的军事斗争中起着举足轻重的作用。典型的洞库可分为天然洞库和人工洞库，它们均是战争中存放军用物资、建立防御工事、隐藏战略武器的绝佳之地。洞库作战的优势是不易被发现，也不易被摧毁，在古往今来的战争中得到了广泛的应用。当代的洞库，大多是在战略要地经人工开凿而成，采用钢筋混凝土或钢制的大门，具有防核、防生物武器和防化学武器的能力，而且大部分洞库的出口都经过精心选择、精心设计、精心伪装，很难以常规方式发起直接的攻击，并且这些洞库上部往往都有厚厚的被覆层，对于现在的各种武器，包括所谓的钻地弹，甚至是核爆，都有足够的抗御能力。在传统的机器人难以对洞库类目标实施有效打击的情况下，发展能多途径投放、大面积抛撒、自主寻迹、自动摧毁目标的智能作战机器人已成为当今机器人研发的热点之一。

在新的作战理论、作战模式和作战需求的不断催化下，武器系统已发展成为由现代设计理论、现代制造技术、现代电子技术、现代控制技术、现代信息技术和现代材料技术等多学科、多领域、多技术有机融合的具有自主探测、搜索、识别、选择、发火、攻击的现代智能武器系统。智能作战机器人是一种现代智能武器系统，它包含了如图 1.4 所示的结构子系统、探测子系统、驱动子系统、控制子系统和毁伤子系统等 5 大系统。智能作战机器人集成并融合了瓣体设计、投放撒布、着地缓冲、快速解脱、弹体扶正、图像探测、目标识别、芯片控制、弹体瞄准、火箭助推、重心稳定、适时起爆等技术，是一种多技术的复合体，其主要研究内容和关键技术为以下 4 个方面。

1. 系统结构设计技术

机械结构是智能作战机器人各个子系统协同工作的运作平台，智能作战机器人建立起完善的机器人机构模型，并设计机器人的整体结构和各子系统的结构细节，该机器人结构平台具有功能强大、结构合理、性能稳定、运作可靠等特点。在仿真分析、样机实验的基础上，提出优化途径和改进措施，使智能作战机器人结构平台真正成为各子系统有机协调、高度融合的依托和支撑。

2. 系统联合控制技术

高效稳定的系统联合控制技术是保证智能作战机器人各个子系统及时、准确地完成相应工作任务的前提。智能作战机器人设计需采用控制功能强、抗扰能力好、综合性能优的硬件控制系统。开发出具有自主知识产权、功能齐备、性能突出、运行稳定、操作简便、嵌入性强、实时性好、可维护性和可扩展性优的软件控制系统，实现智能作战机器人软硬件控制系统的无缝连接和有机融合，是智能作战机器人系统整体性能的高效发挥的重要保障。

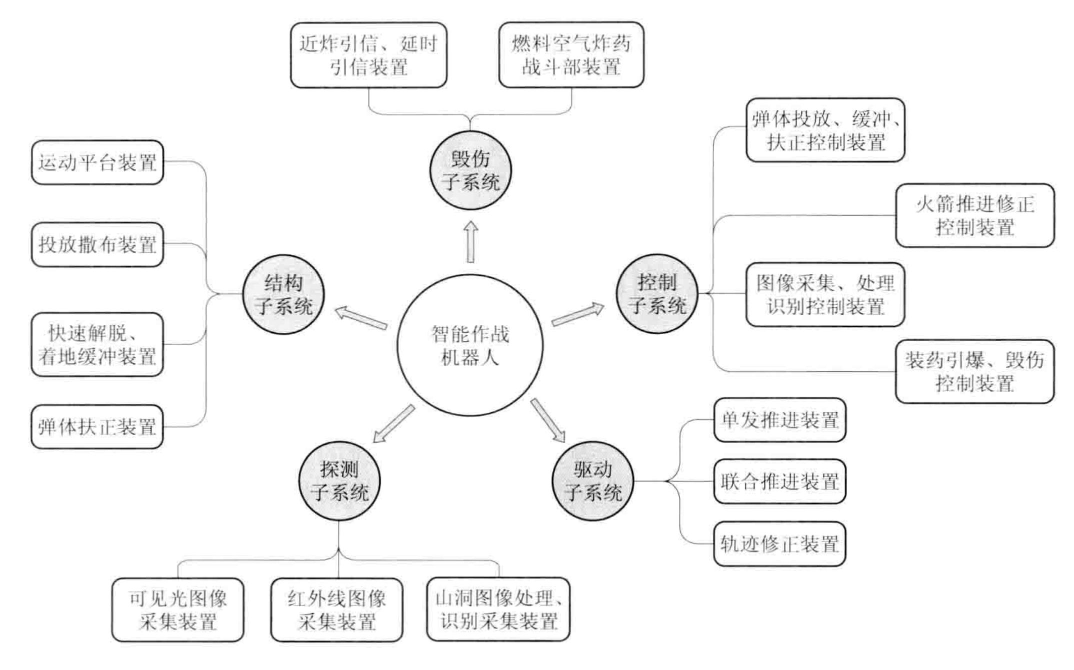


图 1.4 智能作战机器人系统组成示意图

3. 图像采集与目标识别技术

在复杂背景条件下对目标进行图像采集和精确识别是影响智能作战机器人命中率的重要因素，智能作战机器人图像采集与目标识别技术，具有目标搜索能力强、图景拼接精度高的洞库目标图像采集硬件系统，在目标识别、目标定位软件算法的基础上，提出采用改进的霍夫变换检测目标的外形特征，设计具有自主知识产权的洞库轮廓识别技术。针对洞库类目标图像像质较差的问题，提出采用图像转换、图像增强、图像平滑、中值滤波、图像分割、边缘检测、数学形态学处理等方法，强化图像的有用信息，滤除图像的冗余信息，改善图像的信息质量，正确指导对敌洞库目标的精确攻击。

4. 系统相关辅助技术

包括伞降减速技术、着陆缓冲技术、展开扶正技术、火箭发射技术、仿真分析技术、仿真实验技术等。这些技术是智能作战机器人系统研究的重要组成部分，是保证机器人完成预定作战任务必不可少的关键技术。通过合理综合，在科学移植、系统融合相关技术及其成果的基础上，根据智能作战机器人的具体战术指标和作战环境的实际影响因素，巧妙地将上述技术进行了系统改进和有机组合，保证智能作战机器人各子系统在功能上完美组合，在性能上相互促进，在作用上有序衔接，成为可有效发挥预期作战使命的可靠武器系统。

第 2 章　智能作战机器人系统结构设计技术

2.1　智能作战机器人的总体构成

智能作战机器人主要由基本组成、硬件系统和软件系统所构成。作为一种新概念武器，智能作战机器人的反洞库目标作战功能主要表现在介入战场方式多、进入战状时间短、搜索洞库精度高、攻击目标方位准等方面。机器人系统的总体结构反映了其基本作业理念和工作特性，也决定了其所能工作的环境和方式。机器人的总体结构外观如图 2.1 所示。

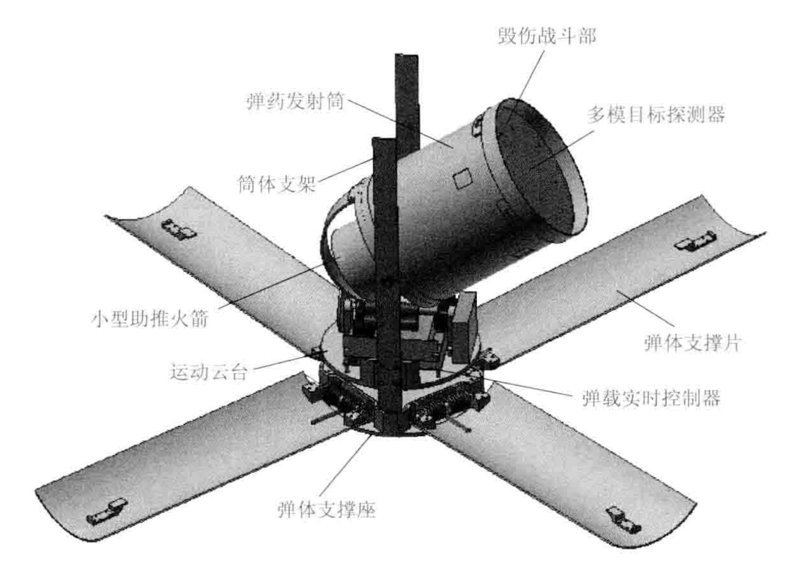


图 2.1　智能作战机器人总体结构外观图

根据智能作战机器人的作战功能和作业流程的需求，图 2.1 中，智能作战机器人配有多模目标探测器（即视觉观瞄组件）、弹载实时控制器（即中央联合控制系统）、小型助推火箭（即火箭推进装置）和毁伤战斗部等部件，具有弹体支撑座（即底座支撑平台）、弹体支撑片、两自由度运动云台、机器人发射筒、战斗部壳体、支架伞仓和端盖等部件与机构。其中多模目标探测器、小型助推火箭和毁伤战斗部结合在一块，形成弹体核心部分，装在机器人发射筒内部。在支撑片未打开前，其还配有降落伞、着地缓冲装置和快速解脱装置等落地展开部件。智能作战机器人投入使用时，首先用遥控方式或

人工方式解除安全保险装置，然后通过多种运载工具或技术手段进行投放，在预定弹着点上空 200 m 高度处打开战术布撒器，布撒出 3～5 个机器人，每个机器人依靠降落伞减速着陆，并依靠弹载缓冲装置进行着陆减震。在着陆瞬间，由内置的快速解脱机构自动解脱降落伞，自由扶正机构则使机器人修正位姿以进入最佳观察和瞄准状态。这时弹载计算机系统进行初始化并自检，装定自毁周期。当自检正常后，由多模目标探测器对周围 360°视场范围内的景物进行自主扫描探测，在正常天气条件下，多模目标探测器可在山体背景条件下有效探测并识别洞库类目标，一旦探测器发现敌方洞库类目标，并经弹载计算机识别确认后，解算出最佳攻击点，通过云台随动装置瞄准目标，启动助推火箭，使机器人向敌洞库目标飞去，再由触发或延时引信适时引爆所携带的燃料空气炸药（或高能炸药等），从而实现精确、迅猛的打击。在子弹发射以后，启动自毁装置进行母弹自爆。假如初始扫描时未能发现目标，在未达到定时自毁时间的条件下，智能作战机器人将处于休眠状态，一段时间后继续进行目标扫描，从而起到封锁洞库和机器人电源系统节能的综合效果。在整个工作过程中，音频探测系统始终处于监听工作状态，一旦有人员试图排弹，将根据其脚步声或车辆接近时发动机的噪声启动反排弹弹体自毁，从而在起到一定打击效果的同时，也大大提高了机器人系统的保密性。

2.2　原理样机的结构设计与特性分析

在智能作战机器人总体设计的基础上，根据机器人的技战术性能指标，认真分析功能、结构与技术之间的内在关系，找出结构设计的着力点和方案创新的突破口，开展智能作战机器人结构设计与特性分析，其研究流程如图 2.2 所示。

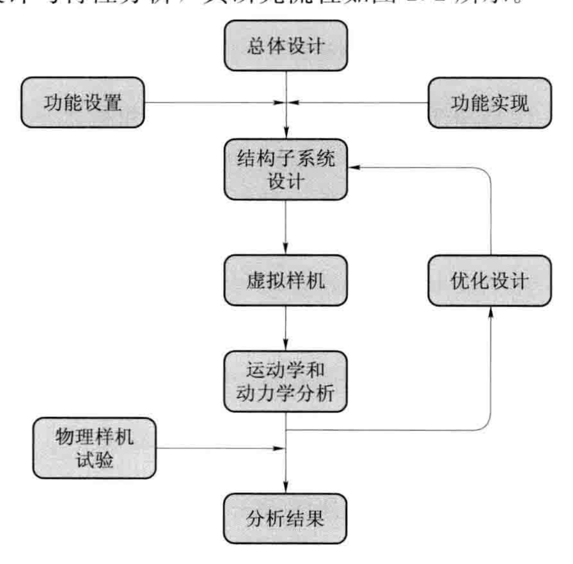


图 2.2　智能作战机器人结构设计与特性分析进程框图

在智能作战机器人结构设计过程中，分析和比较国内外相关或相近智能机器人的特点，在考察和揣摩各种智能机器人结构形式的基础上，确定智能作战机器人相对理想的运动机构和结构形式，运用三维造型软件进行实体建模，通过软件接口，在 Adams 中建立虚拟样机模型，对虚拟样机的运动学和动力学特性进行仿真分析，尤其是对机器人触地展开过程以及探测子系统运动云台的扫描搜索过程进行运动学和动力学分析。在仿真分析、系统比对的基础上，对机器人的运动机构和结构形式进行优化设计和改进设计。在一代原理样机研制成功后（图 2.3），在相关理论的指导和相应技术的支撑下，进行原理样机实验，并与虚拟样机的仿真分析结果进行比较验证，为进一步完善智能作战机器人的整体设计提供了指导性、参考性意见。

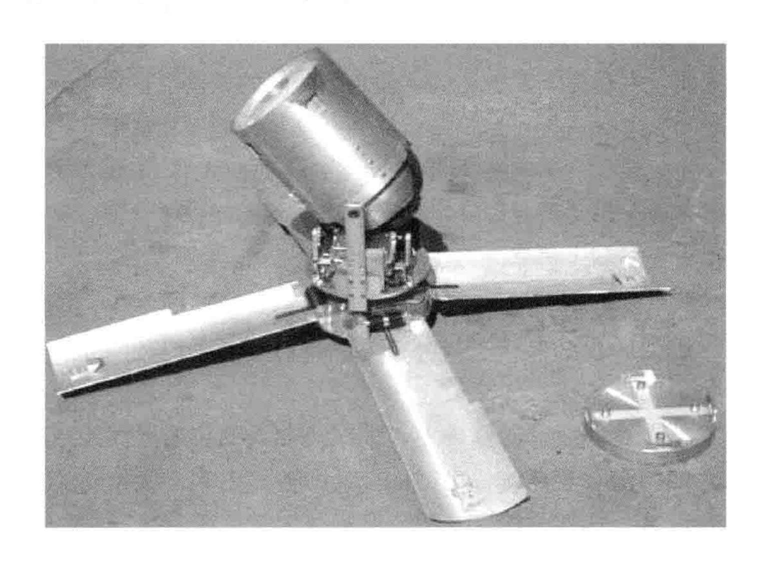


图 2.3　智能作战机器人一代原理样机实物图

智能作战机器人一代原理样机的结构组成如图 2.4 和图 2.5 所示。

由图 2.4（a）可知，智能作战机器人的主体结构呈层状形式，由基座组件、中间组件和上部组件等三部分组成。中间组件中的运动云台具有在水平方向上的周转运动自由度和在垂直方向上的俯仰运动自由度，这两个运动是由两个步进电动机来驱动的。其中水平方向上的周转运动依靠齿轮副的传动实现，垂直方向上的俯仰运动依靠蜗轮蜗杆副的传动实现。由于智能作战机器人在空间尺寸、弹体重量上有极大限制，在结构设计过程中对传动设计和结构布局提出了很高要求。在综合考虑各种因素后，智能作战机器人一代原理样机的主要机械结构设计如下。

1. 一代原理样机基座组件的结构设计

智能作战机器人一代原理样机的基座组件主要起到触地缓冲、自动扶正作用。该组件主要由基座减震弹簧、支撑板扭簧、支撑板和基座组成。智能作战机器人经多种运载工具或技术手段投放撒布后，依靠降落伞减速降落。在机器人着陆触地的瞬间，基座减

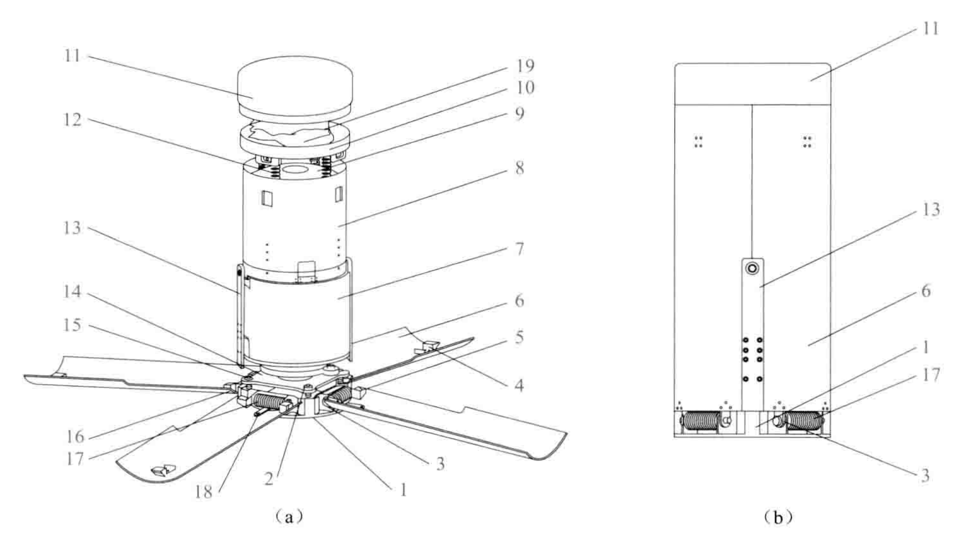


图 2.4　智能作战机器人结构图

1—基座；2—弹簧高度调整螺母；3—支撑板心轴；4—挂钩；5—支撑板固定块；6—支撑板；7—机器人云台；8—发射筒；9—弹丸战斗部；10—伞舱底盘；11—伞舱罩；12—伞舱压簧；13—支架；14—活动弹簧座；15—基座压簧导向轴；16—基座压簧；17—基座扭簧；18—支撑板心轴轴套；19—降落伞

震弹簧受惯性力作用压缩变形，机器人发射筒随之下沉，释放支撑板挂钩，此时受支撑板扭簧作用，打开支撑板，将弹体扶正，为下一步进入搜索模式做好准备。智能作战机器人一代原理样机的基座组件如图 2.5 所示。

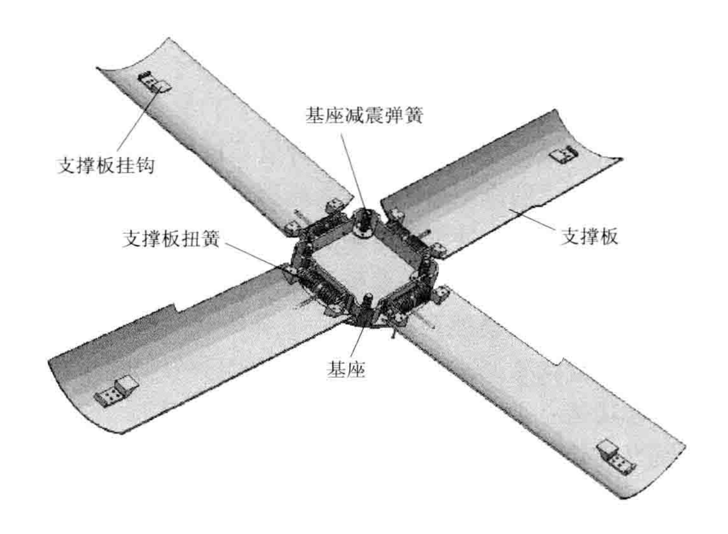


图 2.5　基座组件实体造型图

2. 一代原理样机中间组件的结构设计

智能作战机器人一代原理样机中间组件的作用可谓是“承上启下”，一方面它要能支撑上部组件，充当运动云台和机器人发射筒组件的基础固定平台；另一方面，它又要能协同运动云台和机器人发射筒组件一起在着陆瞬间沿基座减震弹簧导轴下沉一定距离，以释放支撑板挂钩。它主要由中间基板、周转大齿轮和轴承组成（图 2.6）。智能作战机器人完成展开和扶正后，便进入目标搜索模式。通过运动云台的齿轮啮合运动，上部组件绕自身旋转轴旋转，搜索 360°范围内的周围目标。

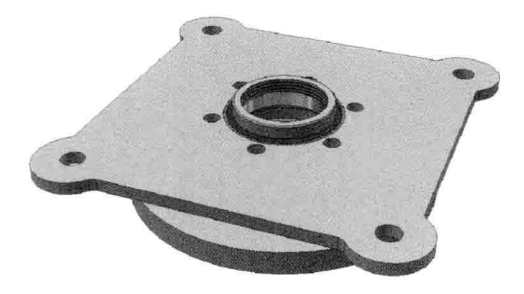


图 2.6 中部组件实体造型图

3. 一代原理样机上部组件的结构设计

智能作战机器人一代原理样机上部组件的主要功能是采集图像、搜索目标、调整方位、点火发射。上部组件主要由上基板、支杆、发射筒、步进电动机等组成（图 2.7）。在搜索模式下，运动云台上的水平周转驱动电动机和俯仰摆动驱动电动机开始有序动作，使视觉观瞄组件分幅分层扫描周边景物，再将分幅分层拍摄所得的景物照片送到图像处理芯片进行全景拼接和目标识别。若发现目标，则生成目标位置，发送到弹载计算机系统主控芯片。主控芯片依据目标位置，再加上修正参数，准确控制水平周转驱动电动机和俯仰摆动驱动电动机运动，待准确瞄准目标后，控制火箭发动机点火，驱动弹丸攻击洞库目标。



图 2.7 上部组件实体造型图

4. 一代原理样机着陆自动展开机构的结构设计

智能作战机器人的着陆自动展开机构属于一种灵巧机构，该机构巧妙借助智能作战机器人在着陆瞬间惯性下沉力的作用而使机器人能迅速自动展开并自动扶正。智能作战机器人通过降落伞减速着陆后，在冲击力作用下，其上、中部组件急速下沉，压缩下部组件基座内的减震弹簧，减震弹簧的缩短变形，使上、中部组件沿减震弹簧导向轴向下运动，此时对应为机器人着陆自动展开机构第一工作阶段（图 2.8）。当上、中部组件下沉后，四个支撑板上的挂钩 4（图 2.4（a））从上部组件发射筒对应的固定槽中脱出，解除对支撑板的锁定功能，此时对应为机器人着陆自动展开机构第二工作阶段（图 2.9）。当支撑板的锁定功能解除后，在支撑板扭簧作用下，四块支撑板自动展开，使机器人自动扶正，此时对应为机器人着陆自动展开机构第三工作阶段（图 2.10），机器人进入临战状态。

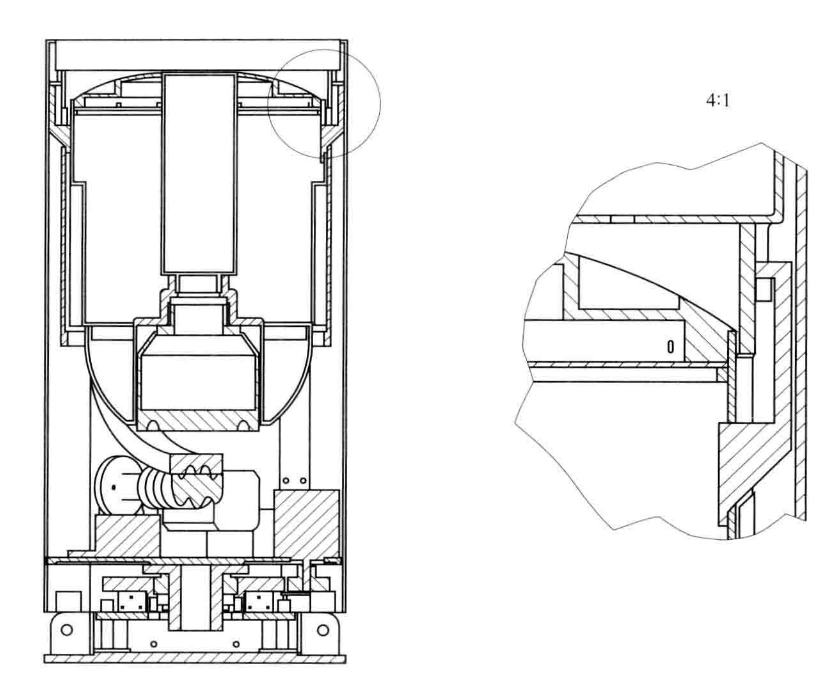


图 2.8　着陆自动展开机构第一阶段作用机理示意图

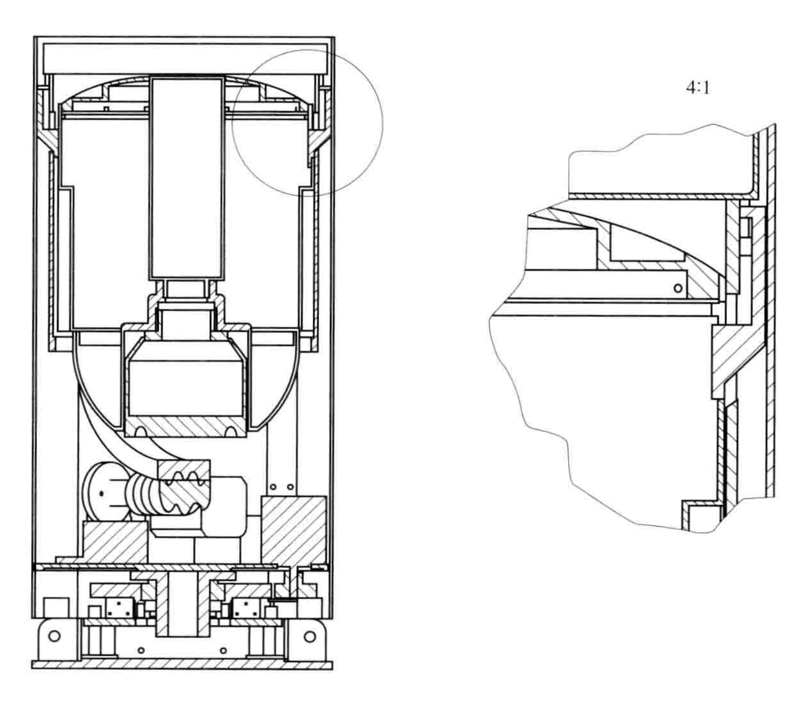


图 2.9　着陆自动展开机构第二阶段作用机理示意图

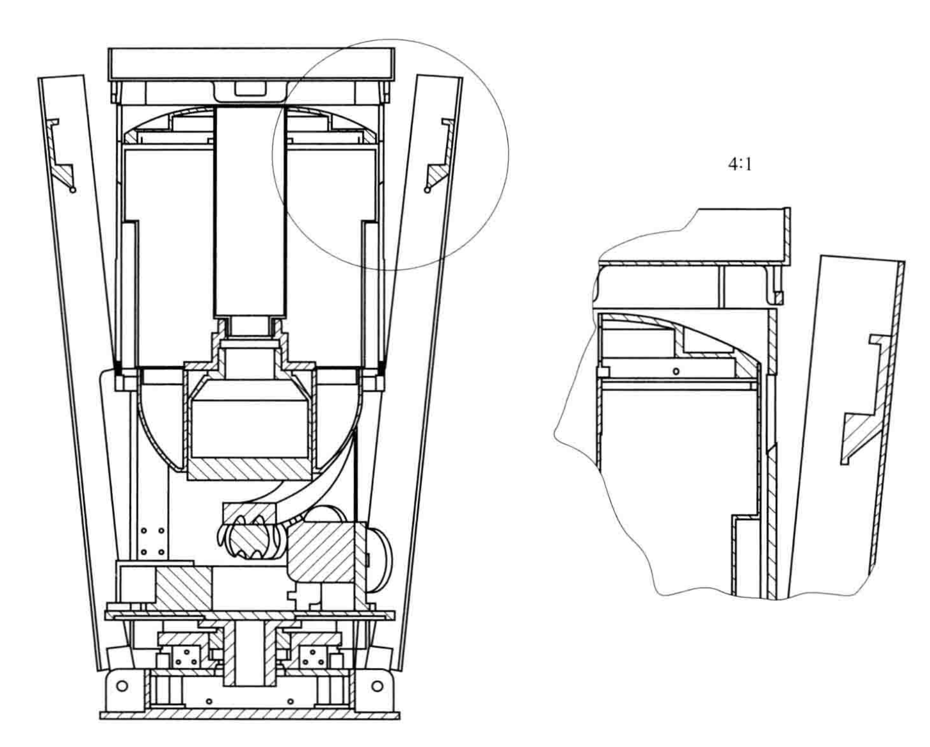


图 2.10 着陆自动展开机构第三阶段作用机理示意图

5. **一代原理样机运动云台的结构设计**

在智能作战机器人整体系统中，结构子系统是各个子系统的依托载体，其运动云台更是探测子系统和毁伤子系统完成方位调整、景物扫描、图像采集、目标瞄准不可缺少的基础部分。

（1）运动云台传动原理简述

在机械设计中，传动系统的设计占有非常重要的地位，传动系统的传动精度将直接决定所设计机械的性能好坏，特别是在要求精确传动的机械设备（如高精度的丝杠车床等）中，传动精度更是至关重要。由此可见，选择满足精度要求的传动形式对智能作战机器人性能意义重大。

一台完整的机器是由机器本体和控制装置组成，其中控制装置又分为机械控制装置、电子控制装置和机电混合控制装置。而机器本体则由动力部分、传动部分和执行部分组成。动力部分是机器的动力来源，如电动机、内燃机和液压马达等；传动部分是将动力部分的动力和运动传递给执行部分的中间环节，如齿轮机构、蜗杆机构和带轮机构等；执行部分是最终直接完成机器各种功能的部分。

智能作战机器人运动云台的功能特性和技术水准体现在启停灵活、反应迅速、旋转平稳、传动准确上，这就需要配备一个高效合理的驱动与传动系统。遂行作战任务时，该运动云台要对战区内全方位洞库类目标进行探测和定位，它应具有两个自由度：一是

能让机器人发射筒本体绕水平轴做俯仰摆动运动（与之对应的传动系统称为云台的俯仰摆动传动系统）；一是能让机器人发射筒本体绕垂直轴做水平周转运动（与之对应的传动系统称为云台的水平转动传动系统）。在上述两个传动系统的协调配合下，能对 360°范围内周边环境进行分幅分层搜索与扫描，也能对该范围内的任一确定目标进行定位、瞄准和打击。这两个传动系统分别用两个执行元件来驱动，其传动原理如图 2.11 所示。

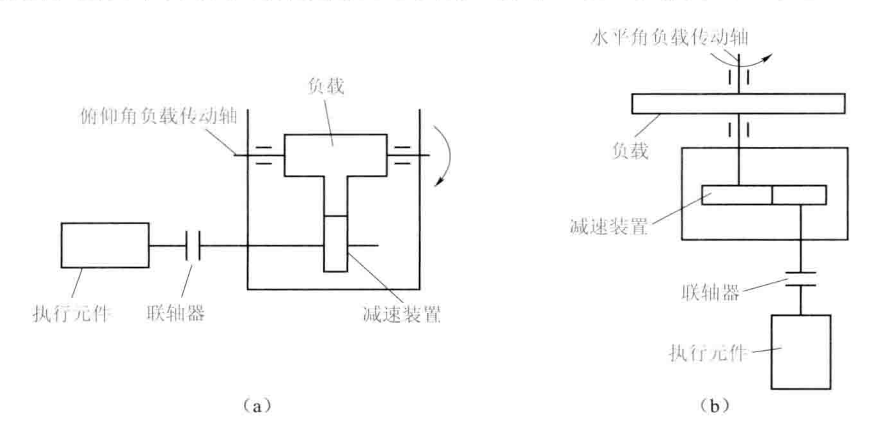


图 2.11　智能作战机器人运动云台传动原理图
（a）俯仰摆动传动原理示意图；（b）水平周转传动原理示意图

（2）运动云台坐标系简介

智能作战机器人的运动云台需完成绕垂直轴方向的回转运动和绕水平轴方向的俯仰摆动。对于运动云台的要求是：执行机构反应迅速、传动准确，能在短时间内驱动机器人发射筒本体到指定的位置，完成对任一方位目标的定位或瞄准。为了正确描述运动云台角度、方位等相关信息，必须建立运动云台的坐标系。

设智能作战机器人的运动云台的机器人基座坐标系为 $XYZO$ 和机器人发射筒本体坐标系为 $X_RY_RZ_RO_R$（图 2.12）。其中，坐标系 $X_RY_RZ_RO_R$ 与机器人发射筒本体相连，原点 O_R 在机器人发射筒本体中心，O_RX_R 轴与机器人发射筒本体的指向重合，斜上方向为正，O_RY_R 始终平行于平面 XOY，且垂直于 O_RX_R 轴，而 O_RZ_R 轴与 O_RX_R 轴、O_RY_R 轴构成右手系。定义 O_RX_R 轴在平面 XOY 上的投影与 OX 轴所成的夹角为机器人发射筒本体水平方向的转动角 θ（称为水平角，以 OX 轴为基准逆时针方向计算），而 OZ 轴与 O_RX_R 轴所成的夹角为机器人发射筒本体俯仰方向的转动角 φ（称为俯仰角，以 OZ 轴为基准顺时针方向计算）。

（3）运动云台驱动力矩的计算

如前所述，智能作战机器人运动云台具有两个自由度，可带动机器人发射筒本体完成在俯仰方向上的摆动和在水平方向上的转动，而这两个运动都需要一定的力矩驱动才能实现。运动云台的驱动力矩对于理论分析和实际应用来说都非常重要，需详细对运动云台相关驱动力矩的进行计算，现阐述如下。

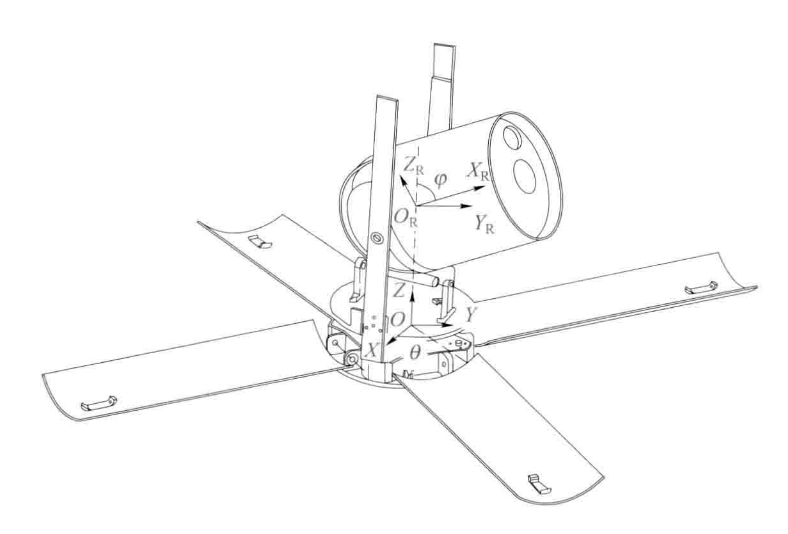


图 2.12 智能作战机器人运动云台坐标系示意图

机器人发射筒本体是运动云台所要驱动的关键部件，其轮廓示意图如图 2.13 所示。机器人发射筒本体的相关尺寸为：

$l=205$ mm；

$l'=102.5$ mm；

$R=95$ mm；

$l''=3R/8=35.625$ mm（发射筒下部半球的重心位置）。

1）运动云台俯仰摆动驱动力矩计算

① 转动惯量计算。

转动惯量的计算可参照图 2.14 进行。机器人发射筒水平轴上部的转动惯量为：

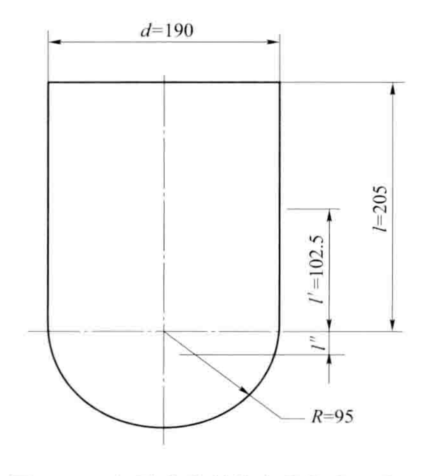


图 2.13 机器人发射筒本体轮廓示意图

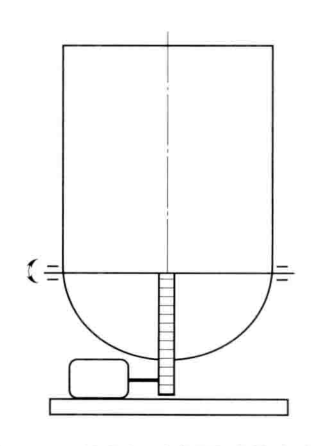


图 2.14 俯仰摆动惯量计算参考图

$$J_{上}=\frac{1}{12}m_{上}(l^2+3R^2)+m_{上}l'^2 \tag{2.1}$$

机器人发射筒水平轴下部的转动惯量为：

$$J_{下}=\frac{1}{5}m_{下}R^2 \tag{2.2}$$

俯仰角方向上机器人发射筒总的转动惯量为：

$$J_{俯仰}=J_1=J_{上}+J_{下} \tag{2.3}$$

② 电动机驱动力矩计算。

设作用在机器人发射筒本体上的驱动力矩为 T_1，先期计算时忽略各种阻力矩。若考虑在电动机启动过程中带动筒体转动时存在角加速度 α_1，则有如下关系成立：

$$T_1=J_1\cdot\alpha_1 \tag{2.4}$$

若希望俯仰摆动方向上发射筒本体转动的角加速度能达到 $\alpha_1=2\ \mathrm{rad/s^2}$，则有：

$$T_1=J_1\cdot\alpha_1=0.067\ 57\times2=0.135\ 14\ (\mathrm{N\cdot m}) \tag{2.5}$$

另外，考虑质心偏离情况，其引起的相应力矩为：

$$T_{上}=m_{上}gl' \tag{2.6}$$

$$T_{下}=m_{下}gl'' \tag{2.7}$$

克服重力偏心所需要的力矩为：

$$T_g=T_{上}-T_{下} \tag{2.8}$$

因此，运动云台在俯仰摆动方向上的总驱动力矩为：

$$T_{俯仰}=T_1+T_g \tag{2.9}$$

2）运动云台水平转动驱动力矩计算

① 转动惯量计算。

当俯仰角为 $\varphi=90°$时（图 2.15（a）），水平角方向上的转动惯量为：

$$J_2=J_1+\frac{1}{2}m_3R^2 \tag{2.10}$$

当俯仰角为 $\varphi=0°$时（图 2.15（b）），水平角方向上的转动惯量为：

$$J_2'=\frac{1}{2}m_2R^2 \tag{2.11}$$

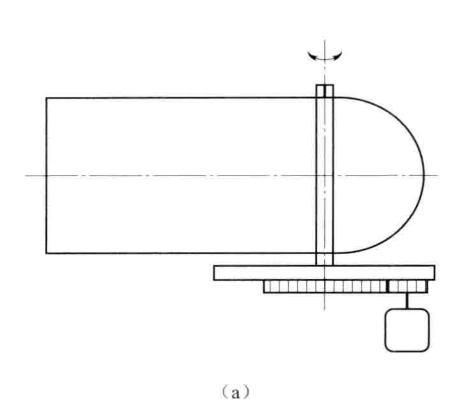
因为 $J_2'<J_2$，故取 $J_{水平}=J_2=0.081\ 107\ 5\ \mathrm{kg\cdot m^2}$。

② 电动机驱动力矩计算。

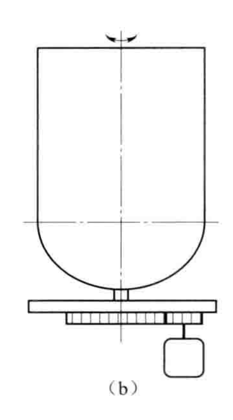
设作用在机器人发射筒本体上的驱动力矩为 T_2，先期计算时忽略各种阻力矩。若考虑在电动机启动过程中带动筒体转动时存在角加速度 α_2，则有如下关系成立：

$$T_2=J_2\cdot\alpha_2 \tag{2.12}$$

若希望在水平转动方向上发射筒本体转动的角加速度能达到 $\alpha_2=10\ \mathrm{rad/s^2}$，则当俯仰角 $\varphi=90°$时，加速力矩最大，此力矩即为运动云台在水平转动方向上的驱动力矩 $T_{水平}$，且有：



(a)



(b)

图 2.15 水平转动惯量计算参考图

(a) $\varphi=90°$；(b) $\varphi=0°$

$$T_{水平}=T_2=J_2\cdot\alpha_2=0.0811075\times10=0.811\ (\mathrm{N\cdot m}) \tag{2.13}$$

(4) 运动云台传动方案选择

在机械传动设计中，常用的传动形式包括齿轮传动、蜗杆传动、带传动、链传动和螺旋传动，每一种传动都有其特点，适用于不同的传动场合，设计者可根据具体的设计要求进行选择或改进。

1) 齿轮传动的特点

齿轮传动之所以成为最重要、最常见的传动方式，是因为其具有传动比恒定、传动效率高、圆周速度快、传递功率范围大和使用寿命长等优点，它可以传递空间任意两轴之间的运动，且结构紧凑。齿轮传动的缺点在于制造和安装的精度要求高，成本较高，精度低时噪声较大，不适用于两轴距离较远时的传动，且无过载保护作用。

2) 蜗杆传动的特点

与齿轮传动方式相比，蜗杆传动具有传动比大、传动平稳、噪声低、有自锁功能等优点。蜗杆传动的缺点是传动效率低、制造成本较高。

3) 带传动的特点

带传动的优点是带轮结构简单、制造成本低、安装和更换方便、有缓冲和吸振的作用、传动平稳、噪声小，可用于两轴间距较大的场合，发生过载时带与带轮之间会产生相对滑动以防止其他零部件被损坏。带传动的缺点在于带与带轮之间存在相对弹性滑动，因而带传动不能保证准确的传动比，且其结构的外形尺寸较大，对轴和轴承的径向压力也较大，带传动的效率较低，带的使用寿命较短，易老化，在高温或易燃场合下不宜使用。

4) 链传动的特点

链传动的优点是没有弹性滑动、平均传动比准确、传动效率较高、链条对轴的拉力较小、可以在较恶劣的条件下工作、承载能力大、制造与安装精度要求较低、轴间距较大且结构简单。链传动的缺点是瞬时传动比不恒定、传动的平稳性差、噪声较大、磨损

后易发生跳齿和脱链、急速反向转动的性能差，不适用于过小的轴间距和有急速换向的传动。

5）螺旋传动特点

螺旋传动的优点是结构简单，机械增益高，传动均匀、准确、平稳，易于自锁。螺旋传动的缺点是摩擦阻力大、传动效率低、磨损快、有侧向间隙、反方向运行时有空行程存在。

综合考虑以上传动方式的优缺点，在满足智能作战机器人对空间尺寸和传动性能严格要求的基础上，选定标准直齿圆柱齿轮传动副来传递水平方向上的周转运动，选定标准蜗杆传动副来传递垂直方向上的俯仰运动。

（5）运动云台传动比的确定

智能作战机器人运动云台的传动比是非常重要的性能指标，在确定运动云台传动比时要综合考虑传动精度、驱动力矩、结构紧凑性等多方面的因素，需要经过反复的调整和计算。设计时应首先考虑系统总的传动比，然后再确定各分级传动比。智能作战机器人运动云台的传动比受以下 3 个因素的影响。

1）传动精度的影响

根据传动比的计算公式，可有：

$$i=\frac{\theta_b}{\Delta\theta} \tag{2.14}$$

式中，i 为传动比；θ_b 为控制电动机转动的分辨率；$\Delta\theta$ 为最终负载转动的分辨率。由该式可以看出，传动比越大，$\Delta\theta$ 就越小，负载的运行精度也就越高。

2）驱动力矩的影响

根据驱动力矩的计算公式，可有：

$$T_L=\frac{T}{i} \tag{2.15}$$

式中，T_L 为折算到电动机轴上的力矩；T 为驱动负载所需的力矩。由该式可以看出，传动比越大，则电动机所需要的力矩越小。

3）结构紧凑性的影响

按前两个性能要求来看，传动比是越大越好，然而太大的传动比势必增加传动机构的体积与复杂度，如采用多级传动，还会降低传动效率，故选定传动比时，一般还需从机构运动的协调性和机构布置的紧凑性出发，综合整个系统的结构尺寸来权衡与确定。

在系统、全面考虑上述诸多因素的实际影响后，确定智能作战机器人运动云台传动比如下：

① 俯仰摆动方向上标准蜗杆传动副的传动比为：$i_{俯仰}=40$；

② 水平周转方向上标准直齿圆柱齿轮传动副的传动比为：$i_{水平}=5$。

（6）运动云台水平周转运动机构的设计

根据前述内容，用于运动云台水平周转运动传递的标准直齿圆柱齿轮传动副选择外

啮合方式，该传动副由一个大齿轮和一个小齿轮组成，传动时大齿轮固定不动（大齿轮与机器人基座相连），小齿轮为主动轮（小齿轮与机器人运动云台底座相连），绕大齿轮做圆周运动（带动运动云台绕机器人本体垂直轴做水平周转运动）。机器人水平转动机构的运动传递原理和装配情况分别如图 2.16 和图 2.17 所示。

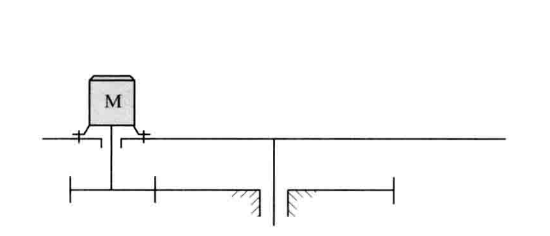


图 2.16 水平转动机构传动原理示意图

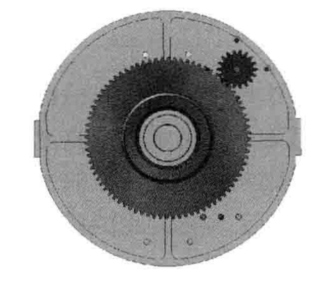


图 2.17 水平转动机构装配示意图

上述机构中所用标准直齿圆柱齿轮传动副的具体参数见表 2.1。

表 2.1 水平周转齿轮机构设计参数一览表

名称	符号	公式	设计值	
模数	m		1.5	
齿数	z	$z \geqslant z_{\min} = \frac{2h_a^*}{\sin^2\alpha}$	18	80
压力角	α	α	20°	
分度圆直径	d	$d = mz$	27	120
基圆直径	d_b	$d_b = d\cos\alpha$	25.372	112.764
齿距	p	$p = \pi m$	4.712	4.712
齿厚	s	$s = \frac{\pi m}{2}$	2.356	2.356
齿槽宽	e	$e = \frac{\pi m}{2}$	2.356	2.356
齿顶高	h_a	$h_a = h_a^* m$	1.5	1.5
齿根高	h_f	$h_f = (h_a^* + c^*)m$	1.875	1.875
齿高	h	$h = h_a + h_f$	3.375	3.375
齿顶圆直径	d_a	$d_a = d + 2h_a = (z + 2h_a^*)m$	30	123
齿根圆直径	d_f	$d_f = d - 2h_f = (z - 2h_a^* - 2c^*)m$	23.25	116.25
中心距	a	$a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{z_1 + z_2}{2}m$	73.5	
齿数比	u	$u = \frac{z_2}{z_1}$	4.444	

（7）运动云台俯仰摆动运动机构的设计

智能作战机器人运动云台的俯仰摆动由 ZA 型蜗杆传动副来实现，其在运动云台中的传动原理和装配关系分别如图 2.18 和图 2.19 所示。该蜗杆传动副的具体参数见表 2.2。

表 2.2　俯仰摆动 ZA 型蜗杆机构设计参数一览表

名称	符号	公　式		设计值	
分度圆直径	d_1	$d_1=mq$	$d_2=mz_2$	25	175
齿顶高	h_a	$h_a=m$		2.5	
齿根高	h_f	$h_f=1.2m$		3	
齿顶圆直径	d_a	$d_{a1}=(q+2)m$	$d_{a2}=(z_2+2)m$	30	180
齿根圆直径	d_f	$d_{f1}=(q-2.4)m$	$d_{f2}=(z_2-2.4)m$	19	169
蜗杆螺旋线升角	γ	$\gamma=\arctan\frac{z_1}{q}$		5°42′38″	
蜗轮螺旋角	β	$\beta=\gamma$		5°42′38″	
蜗杆轴向齿距	p_{a1}	$p_{a1}=p_{t1}=\pi m$		7.854	
蜗轮端面齿距	p_{t1}				
径向间隙	c	$c=0.2m$		0.5	
标准中心距	a	$a=0.5(d_1+d_2)=0.5(q+z_2)m$		100	

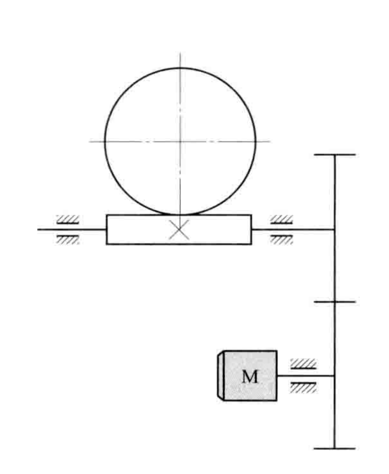




图 2.18　俯仰摆动机构传动原理示意图

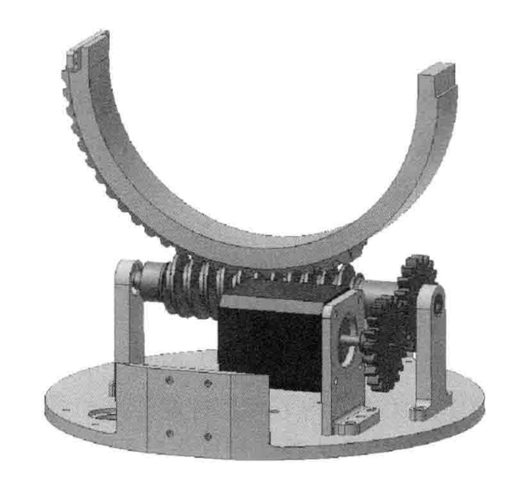


图 2.19　俯仰摆动机构装配示意图

6. 一代原理样机战斗部的结构设计

战斗部的结构设计是智能作战机器人结构系统设计的重点和难点。战斗部结构设计时应着重考虑以下 3 个方面的问题：一是战斗部的装药结构和形状尺寸，应以满足作战

需求为主，但战斗部的结构形状、连接方式以及相关尺寸都与智能作战机器人的总体结构息息相关，必须根据智能作战机器人的整体性能和具体条件而定；二是智能作战机器人战斗部的结构设计与装载在机器人发射筒上的视觉器件、助推火箭以及伞舱结构紧密相连，必须妥善考虑这些器件和装置的布置形式；三是战斗部的结构形状、重心位置、体积大小等方面应与智能作战机器人总体设计相协调，并能有效保证相关装配、调试工作的顺利进行。

战斗部结构参数是表征战斗部结构基本特点和性能的依据，包括战斗部长径比、总重量、装填炸药质量、炸药密度、装填系数，等等。结构参数可反映战斗部的作战威力和结构特性，是战斗部结构设计和特性分析的必备数据。

（1）战斗部外部的结构设计

战斗部外部主要是战斗部的壳体，壳体是战斗部的基体，起着支撑、包覆和连接内部器件与装置的作用。根据设计要求，壳体一方面要满足飞行、投掷等过程中的过载要求；另一方面，作为重要的受力部件，又要满足各种载荷条件下的强度和刚度要求；同时，还要求其体积小、重量轻、形状合理、结构紧凑、研制费用低、研制周期短，且具有良好的加工、装配、调试的性能。因此，在一代原理样机设计时，战斗部外壳采用整体型薄壳结构（薄壳结构是指壳体壁厚与壳体之净值比小于 0.05，主体部分为圆柱体薄壁圆筒，其壁厚为 3 mm）是合理的，因为这种整体型薄壳结构具有结构简单、制作方便、作用可靠性高、自生存能力强、性价比高、飞行阻力小等优点。

（2）战斗部内部的结构设计

在进行战斗部内部结构设计时，需考虑筒体长径比的要求。长径比是指弹体长度与直径之比，它是战斗部结构尺寸的一个重要参数。智能作战机器人装载的是燃料空气炸药，战斗部长径比 X 的选择主要考虑其对燃料空气炸药云雾状态的影响以及低阻弹的需求，长径比大的弹体，其云雾径向膨胀速度在燃料空气炸药抛撒的近场阶段远大于长径比小的弹体。根据研究，长径比在一定的范围内，只要合理匹配战斗部壳体和装药结构，则可以使结构尺寸参数均达到理想状态。

智能作战机器人筒体结构设计时不仅需要考虑长径比的问题，而且由于智能作战机器人具有自动探测目标的功能，其视觉观瞄器件需装在弹体前端，视觉系统控制板及电源设备则与智能作战机器人控制子系统共享，因此，视觉观瞄器件及其线路需穿过战斗部筒体。此外，为了满足智能作战机器人洞库作战的毁伤力要求，其设计装药量需为 3～5 kg，因此，战斗部筒体装药舱体积不能过小。

根据以上特点，经过精心设计，拟定了两种战斗部筒体结构形式，一是观瞄器件中置方案，二是观瞄器件侧置方案，两种设计方案的结构情况分别如图 2.20 和图 2.21 所示。

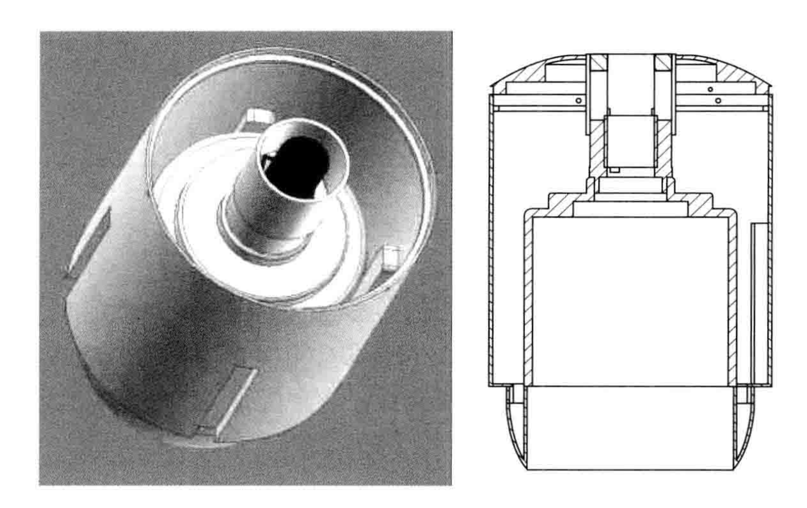


图 2.20 观瞄器件中置结构设计方案

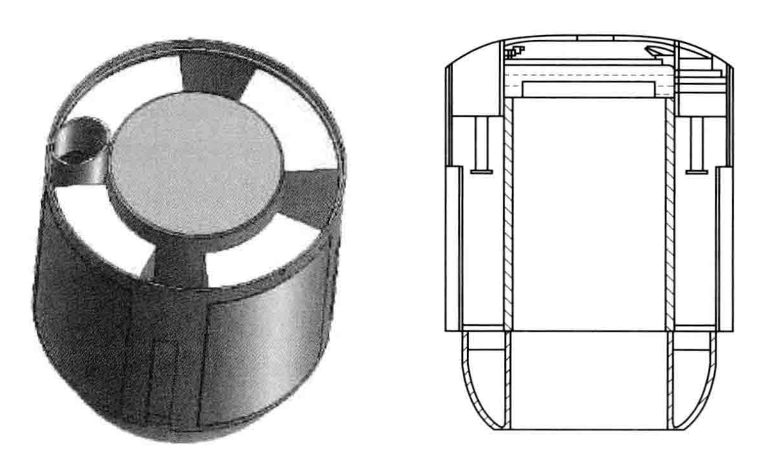


图 2.21 观瞄器件侧置结构设计方案

图 2.20 所示方案为视觉观瞄器件沿战斗部中心轴线安装形式，其优点是重心保持在中轴线上，可增强弹体飞行时的稳定性，且方便器件连接线的走线。由于视觉观瞄系统中的摄像头采用封闭型套筒包裹固定，与战斗部筒体内孔、助推火箭外部套筒形成密闭型隔离区，不影响半液态式燃料空气炸药的装填，能最大限度地利用弹体空间，可装药体积约为 2 300 cm^3。但由于视觉观瞄系统整体长度的影响，战斗部轴向长度会比第二种方案增加 15 mm。

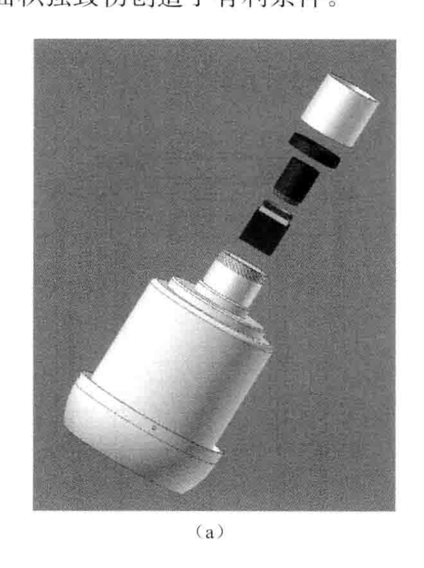
图 2.21 所示方案为视觉观瞄器件沿与战斗部中心轴线平行而侧置的安装形式，其优点是摄像头侧置可有效缩短战斗部整体高度，但弹体空间的利用率有所降低。

两种设计方案相关参数的对比情况见表 2.3。

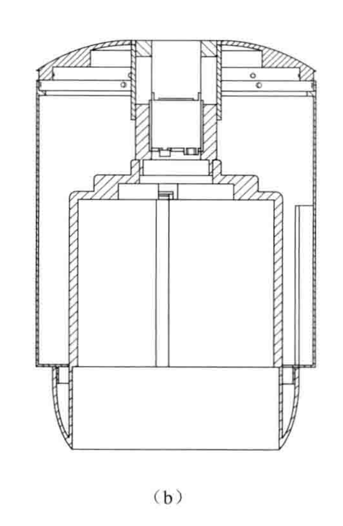
表 2.3 战斗部结构设计方案参数对比一览表

方案	最大装药体积/cm^3	装药量/kg	战斗部整体高度/mm
方案一	2 300	3.6	265
方案二	2 000	3.15	250

由于战斗部结构设计时需要优先考虑满足装药量的要求，选定视觉观瞄器件沿战斗部中心轴线安装形式作为智能作战机器人一代原理样机战斗部结构设计的终选方案，并对该方案进行了细化设计，具体设计结果如图 2.22 所示。由图可知，智能作战机器人战斗部筒体主体部分为圆柱形薄壁圆筒，当燃料空气炸药引爆时，炸药在径向方向抛撒，容易形成轴对称大面积的燃料空气混合物，从而在敌洞库内形成理想的爆轰云团，为实现大面积强毁伤创造了有利条件。



(a)



(b)

图 2.22 一代原理样机战斗部结构设计示意图

(a) 视觉观瞄器件装配示意图；(b) 战斗部内部结构剖视图

7. 一代原理样机弹簧组件的设计

弹簧是机电装置中常用的弹性零件，其性能直接影响机电装置的工作效率，其设计尤为重要。随着机电装置功能特性和性能水平的不断提高，对弹簧的要求越来越多、越来越严格。特别是一些在关键场合发挥关键作用的弹簧，其设计质量往往关系重大，需要设计者通过优化设计思路与方法，才能设计出符合设计需求的弹簧。

根据智能作战机器人承担的特殊作战使命，以弹内弹簧在长期储能状态下能够保持正常的塑性变形能力为设计目标，以簧丝直径、弹簧中径和有效工作圈数为主要参数，以剪切强度要求、最大变形条件、旋绕比等为约束条件，对智能作战机器人伞舱压缩弹簧、基座承重压缩弹簧、基座支撑板扭转弹簧进行了优化设计，并利用 Adams 仿真建

模技术深入分析了弹簧在实际运用过程中性能参数的变化情况，同时对原始设计参数进行了相应修改，得到了很好的设计效果。

（1）伞舱压缩弹簧的设计

伞舱压缩弹簧是智能作战机器人降落伞快速脱离机构的关键零件，该解脱机构由伞舱、降落伞、伞舱压缩弹簧等主要零部件组成，其工作过程为：智能作战机器人通过伞降装置着陆瞬间，因与地面冲击而产生的惯性下沉力，使机器人基座承重压缩弹簧产生缩短变形，导致机器人中、上部结构件相对于基座下移，使支撑板挂钩从机器人发射筒对应卡槽中脱离，并在支撑板扭簧的作用下向外展开支撑板。在支撑板挂钩解脱的同时，装置在机器人战斗部顶部的伞舱也解脱了与机器人发射筒之间的连接关系，当伞舱解脱束缚后，伞舱压缩弹簧快速向斜上方弹开伞舱及与之相连的降落伞，完成降落伞解脱过程。该机构能够巧妙利用弹性元件的作用和部件之间的锁固关系，从而在非常紧凑的空间范围内安装降落伞快速脱离机构，保证在机器人着陆时，通过伞舱的快速解脱和弹离智能作战机器人本体，避免降落伞遮盖机器人，造成智能作战机器人无法顺利实现后续任务。因此，合理设计伞舱压缩弹簧的性能参数对智能作战机器人快速解脱机构起着重要作用。

根据机器人对快速解脱机构的具体要求，伞舱压缩弹簧的设计条件及要求如下：

① 伞舱约为 340 g，在机器人基座支撑板挂钩脱开机器人发射筒壁而使作用于伞舱上的锁紧力消除后，能通过伞舱压缩弹簧的弹性恢复力使伞舱向斜上方弹起，脱离弹体。

② 为了尽量缩短智能作战机器人的整体长度，使机器人重心向下沉移，减少智能作战机器人运动云台在俯仰摆动时的前端负荷，伞舱压缩弹簧在机构动作前应尽量处于最大压缩状态。

③ 战斗部顶部为圆弧面，弹簧座孔与伞舱底面的距离为 15～17 mm，要求压缩弹簧能在该空间内正常安装并保证在解脱时能将伞舱弹起不低于 1 000 mm 的高度。

④ 设计应常规化、简单化、标准化，避免因顾虑太多而导致对弹簧材料、加工工艺产生过高要求。

在仔细分析了该弹簧的性能要求之后，合理运用弹簧设计理论及方法，开展的具体的设计工作如下。

1）仿真建模

为使伞舱压缩弹簧能正常工作，首先考虑在战斗部顶部开设 4 个均匀分布的弹簧定位座孔，其作用类似于加装弹簧导套。该弹簧座孔的深度可通过加减垫片调整，其到伞舱底面的距离为 15～17 mm。根据压缩弹簧的设计理论，弹簧安装长度越长，弹簧所能承受的最大工作载荷也越大，因此给出伞舱压缩弹簧的仿真建模方案如图 2.23 所示。

2）初始参数条件的选择与确定

根据一般弹簧的设计理论与经验，预设该弹簧在常规设计尺寸条件下可满足的功能要求，由此可按一般弹簧的设计思路开展设计工作。根据前述约束条件，预先确定部分初始条件见表 2.4。

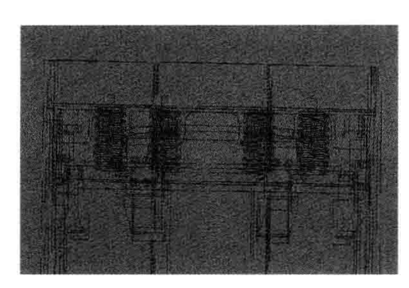
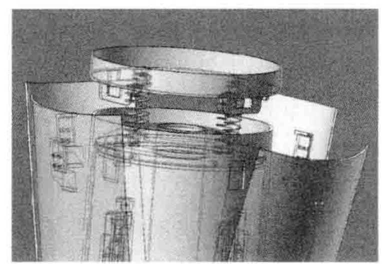



图 2.23　伞舱压缩弹簧仿真建模图

表 2.4　伞舱压缩弹簧初始条件一览表

参数名称	单位	条件及数据计算
伞舱盖质量	g	340
弹簧材料		碳素弹簧钢丝,C级
弹簧类别	次数	$N=1:10^3$
端部结构		端部并紧、磨平,支撑圈数为1圈
压并高度 H_b	mm	$H_b \leqslant 15$ mm,取 $H_b=15$ mm
旋绕比 C		根据圆柱螺旋压缩弹簧的旋绕比 C,一般取5～8
簧丝直径 d	mm	由于依据所给原始参数,所得弹簧的设计结果不唯一,且该弹簧的设计要求一般,所以可利用压并高度的限制条件 $H_b=(n+1.5)d=15$ mm,且利用有效圈数应不低于6的设计经验,此外,尽量增大 d,使弹簧刚度增加,从而增大弹簧最大工作载荷,故取 $n=6$,$d=2$ mm
有效圈数 n	圈	

3）关键参数的优化选择

根据前述设计要求，通过弹簧的作用高度可得以下公式：

$$4\times\frac{1}{2}K_F f^2 \geqslant mgh \tag{2.16}$$

式中，K_F 为弹簧刚度；f 为压缩变形量。由于安装条件的限制，弹簧压缩后的长度为15 mm，考虑到伞舱弹出方向所受的空气阻力，取 $h=1\ 500$ mm，带入原始条件参数可得：

$$4\times\frac{1}{2}K_F f^2 = 2K_F(H_0-15)^2 \geqslant mgh = 6\ 450\ \text{kg}\cdot\text{mm/s}^2 \tag{2.17}$$

通过上述约束条件及弹簧尺寸关系，由已经确定的簧丝直径，分别取环绕比为5～8时的弹簧中径值，再通过查表及公式计算，可对比分析出最优的设计条件，具体结果见表2.5。

表 2.5 伞舱弹簧优化设计参数对比表

初始条件 $d=2, n=6$	弹簧中径 D	弹簧刚度 P'（查表）/(N·mm^{-1})	弹簧刚度 K_F/(N·mm^{-1})	极限载荷下单圈变形量 f_i(查表)/mm	自由高度/mm $H_0=n(f_i+d)+1.5d$	是否满足 $2K_F(H_0-15)^2 \geqslant mgh$
$C=5$	$D=Cd=10$	158	26.3	1.297	23	不满足
$C=6$	$D=Cd=12$	91.4	15.2	1.954	27	不满足
$C=7$	$D=Cd=14$	57.6	9.6	1.923	26	不满足
$C=8$	$D=Cd=16$	38.6	6.4	3.676	38	满足

因此，可选择 $C=8$ 时的参数。

4）伞舱压缩弹簧其他参数的计算

其他参数的计算结果见表 2.6。

表 2.6 伞舱压缩弹簧参数表

参数名称	单位	条件及数据计算
旋绕比 C		$C=8$
K		$K=\frac{4C-1}{4C-4}+\frac{0.615}{C}=1.184$
弹簧刚度 K_F	N/mm	根据 $d=2$，$D=16$ mm 查表得 $P'=38.6$ N/mm，则 $K_F=P'/n=6.4$
弹簧压缩量即工作行程 f	mm	设计要求 4 个弹簧能将降落伞伞舱弹起约 1 000 mm 高度，通过计算空气阻力的影响，取 $h=1\,500$ mm，从而有： $2Kf^2 \geqslant mgh$，其中 f 为弹簧压缩量，h 为弹起高度 得 $f \geqslant 20$ mm，取 $f=23$
自由高度 H_0	mm	$H_0=nt+1.5d=n(f_i+d)+1.5d$ 得 $H_0=38$
弹簧中径 D	mm	$D=Cd=16$
弹簧内径 D_1	mm	$D_1=D-d=16-2=14$
弹簧外径 D_2	mm	$D_2=D+d=16+2=18$
总圈数 n_1	圈	$n_1=n+2=8$
节距 t	mm	$t=\frac{H_0-1.5d}{n}=4.5$
间距 δ	mm	$\delta=t-d=2.5$
最大工作载荷 P_n	N	$P_n=K_F f=128$

5）伞舱压缩弹簧的稳定性验算

对于长径比 b 较大的压缩弹簧，当其轴向载荷达到一定值时就会产生侧向弯曲而失去稳定性。对于一般压缩弹簧来说，为了便于制造且避免失稳现象，在弹簧两端固定时，其长径比 $b<5.3$；弹簧一端固定时，长径比 $b<3.7$；弹簧两端自由时，长径比 $b<2.6$。为了确保使用性能，弹簧长径比 $b=H_0/D$ 应满足下列要求：

① 弹簧两端固定时，取 $b\leqslant5.3$；

② 弹簧一端固定，另一端自由时，取 $b\leqslant3.7$；

③ 弹簧两端自由时，取 $b\leqslant2.6$。

当弹簧长径比大于上述数值时，需按照下式进行计算：

$$F_C=C_uK_FH_0>F_{max} \tag{2.18}$$

式中，F_C 为弹簧稳定时的临界载荷；C_u 为弹簧不稳定系数；K_F 为弹簧刚度；H_0 为弹簧自由高度。

如所得结果不满足上式，应重新选取参数，改变 b 值，提高弹簧临界载荷以保证弹簧的稳定性。如结构受到限制、不能改变参数时，应设置弹簧导杆或导套。此外，为保持弹簧特性，长径比 $b=H_0/D$ 应大于 0.4。

根据智能作战机器人伞舱压缩弹簧的相关参数，经计算得 $b=1.9$，该弹簧安装时两端自由，不需固定，但由于智能作战机器人战斗部顶部与伞舱底板之间容易产生相对移动，为了确保伞舱压缩弹簧能顺利执行解脱任务，在战斗部顶部设计下沉式导孔，在伞舱底板对应位置处加装导杆，由此来保证伞舱压缩弹簧的稳定性。根据导杆、导孔与弹簧之间的间隙关系，设计导杆外径为 13 mm，导孔直径为 19 mm。

6）伞舱压缩弹簧的强度验算

对于受循环载荷作用的重要弹簧，应进行疲劳强度验算。对于受载荷作用次数少的弹簧，还应进行静强度计算。由于智能作战机器人伞舱压缩弹簧属于不受循环载荷的少次数使用压缩弹簧，故应进行静强度计算，计算公式如下：

$$S=\frac{\tau_S}{\tau_{max}}\geqslant S_p \tag{2.19}$$

式中，S 为安全系数；S_p 为许用安全系数，当弹簧设计计算和材料试验精确度高时，取 S_p 为 1.3～1.7；当精确度低时，取 S_p 为 1.8～2.2；τ_S 为弹簧材料的屈服极限；τ_{max} 为最大工作载荷产生的最大切应力，该应力可按下式进行计算：

$$\tau_{max}=\frac{8KD}{\pi d^3}P_n \tag{2.20}$$

根据智能作战机器人伞舱压缩弹簧的簧丝直径及弹簧中径，查表可得其屈服极限为 855 MPa。

根据表 2.6 中的计算参数，带入公式（2.20），可得：

$$\tau_{max}=\frac{8KD}{\pi d^3}P_n=480\ \text{MPa}$$

将 τ_S 及 τ_{max} 带入公式（2.19），可得：

$$S=\frac{\tau_S}{\tau_{max}}=1.78$$

可知其满足安全使用要求。

7）其他相关改进设计及说明

① 为了保证机构在解脱时，伞舱压缩弹簧能使伞舱向斜上方弹出，保证降落伞下落后不遮盖弹体，将伞舱压缩弹簧中两个弹簧的设计参数修改一下，即将其簧丝直径由 2.0 mm 改为 1.6 mm，这样在作用于伞舱底板时 4 个弹簧的作用力大小不一，可使伞舱向斜上方弹出。

② 采用双向固定法对伞舱压缩弹簧进行位置限定，即通过伞舱底板处加装的 4 个导杆以及战斗部顶部对应位置处开设的 4 个下沉式导孔，使伞舱压缩弹簧侧向稳定性得到提升，保证弹簧解脱伞舱功能的实现。

③ 由于该弹簧压缩变形比较大，为了长期保持其弹性，需要注意弹簧的加工工艺和热处理效果。

（2）基座承重压缩弹簧的设计

基座承重压缩弹簧是智能作战机器人实现缓和冲击、保护器件、快速解脱、支撑系统、稳定弹体的关键零件，它属于机器人着陆缓冲装置的重要组成部分。该着陆缓冲装置由基座、橡胶减震块、弹簧板、承重压缩弹簧等零部件组成，其承重缓冲原理为：当机器人通过伞降系统减速着陆时，在惯性力的作用下，机器人上、中部结构向下沉降，此时基座承重压缩弹簧产生压缩变形，吸收机器人冲击能量，减轻冲击对机器人重要器件的不利影响。同时，利用弹簧压缩变形而产生的机器人上、中部结构下沉，释放支撑板挂钩，以便借助支撑板扭簧的扭力展开支撑板，扶正弹体。基座承重压缩弹簧变形量可通过弹簧板上的调整螺母加以改变，使之适合使用要求。由于基座承重压缩弹簧的设计效果直接影响机器人相关功能的实现，需对其进行精心设计。

根据智能作战机器人对着陆缓冲装置的设计要求，确定基座承重压缩弹簧的具体设计条件及要求如下：

① 弹簧板上部组件的总质量约 10 kg，其重力均匀施加于各弹簧板上；

② 据测算，智能作战机器人的着陆速度峰值约为 8 m/s；

③ 为了控制弹簧整体高度，弹簧板与底座之间的弹簧许用安装高度不高于 20 mm，在此高度下，基座承重压缩弹簧应能支撑起上部组件；

④ 在着陆瞬间冲击力的作用下，弹簧的压缩变形量应达到 8 mm 以上，保证支撑板挂钩能顺利从机器人发射筒对应槽孔中解脱。

1）初步设计

根据智能作战机器人功能特点和作战使命可知，基座承重压缩弹簧有两个作用：一是在机器人装配完毕时产生第一次变形，此时承受的是静态工作载荷，要求弹簧在该变

形条件下能够起到保持弹体稳定、维持系统正常运转的作用；二是在着陆瞬间产生第二次变形，起到吸收冲击能量、保护重要器件、释放支撑板挂钩、解脱伞降系统的作用。根据基座承重压缩弹簧的性能要求，确定初始参数条件见表 2.7。

表 2.7 基座承重压缩弹簧初始条件一览表

参数名称	单位	条件及数据计算
上部组件重量 M	kg	$M=10$
弹簧材料		碳素弹簧钢丝，C 级
弹簧类别	次数	$N=1:10^3$
端部结构		端部并紧、磨平，支撑圈数为 1 圈
弹簧个数 A	个	为了强化缓冲作用，在基座中应多装弹簧，根据底座空间的具体条件，可取 $A=4$
第一变形载荷 P_1	N	为保证基座承重压缩弹簧在智能作战机器人着陆前对机器人上、中部组件的支撑作用，确保不会因长时间存放而导致应力松弛现象出现，设定弹簧的安装变形时的载荷为所需载荷的 1.5 倍，即 $P_1\geqslant 1.5\times\frac{1}{A}Mg=\frac{150}{A}=37.5$
第一压缩高度 H_1	mm	$H_1=20$
第二压缩高度 H_2	mm	$H_2=10$
压并高度 H_b	mm	$H_b\leqslant 12$ mm，取 $H_b=10$

2）关键参数的确定

根据单个弹簧在第一次变形情况下对其工作载荷量的限制条件（表 2.7），可有：

$$P_1\geqslant 1.5\times\frac{1}{A}Mg=\frac{150}{A}=37.5\ \text{N} \tag{2.21}$$

由于弹簧在第一次变形后的压缩高度必须是 20 mm，且第二次变形量必须大于 8 mm，根据压并高度公式 $H_b=(n+1.5)d=10$ mm 可限定簧丝直径与有效圈数的关系。

根据上述条件，分别选取三组 $n-d$ 数据，即：

① $n=6$，$d=1.2$ mm；

② $n=5$，$d=1.4$ mm；

③ $n=4$，$d=1.6$ mm。

根据上述三组数据进行相关计算，可得具体设计结果见表 2.8：

表 2.8　基座承重压缩弹簧设计参数一览表

初始条件	弹簧中径 D /mm	弹簧刚度 K_F /(N·mm^{-1})	自由高度 H_0 /mm	第一变形量 f_1 /mm	是否满足 $P_1=K_F f_1 \geqslant 37.5$ N
$d=1.2, n=6$	7	10	16	−4	—
$d=1.2, n=6$	8	6.7	19	−1	—
$d=1.2, n=6$	9	4.7	22	2	$P_1=9.4$ N<37.5 N
$d=1.2, n=6$	10	3.4	25	5	$P_1=17$ N<37.5 N
$d=1.2, n=6$	12	2	34	14	$P_1=28$ N<37.5 N
$d=1.2, n=6$	14	1.24	42	22	$P_1=27.8$ N<37.5 N
$d=1.2, n=6$	16	0.82	54	34	$P_1=27.9$ N<37.5 N
$d=1.4, n=5$	12	4.4	22	2	$P_1=8.8$ N<37.5 N
$d=1.4, n=5$	14	2.74	32	12	$P_1=32.9$ N<37.5 N
$d=1.4, n=5$	16	1.85	38	18	$P_1=33.3$ N<37.5 N
$d=1.4, n=5$	18	1.3	46	26	$P_1=33.8$ N<37.5 N
$d=1.6, n=4$	14	5.9	24	4	$P_1=23.6$ N<37.5 N
$d=1.6, n=4$	16	3.9	28	8	$P_1=31.2$ N<37.5 N
$d=1.6, n=4$	18	2.8	34	14	$P_1=39.2$ N>37.5 N
$d=1.6, n=4$	20	2	40	20	$P_1=40$ N>37.5 N
$d=1.6, n=4$	22	1.5	48	28	$P_1=42$ N>37.5 N

3）其他参数计算

按照圆柱压缩弹簧的设计公式及经验，根据表 2.8 的已有条件，能够满足基座承重压缩弹簧设计要求的理想参数情况见表 2.9。

表 2.9　基座承重压缩弹簧参数表

参数名称	单位	条件及数据计算
簧丝直径 d	mm	$d=1.6$
弹簧中径 D	mm	$D=22$
有效圈数 n	圈	$n=4$
弹簧自由高度 H_0	mm	$H_0=48$
第一变形量 f_1	mm	$f_1=28$
第二变形量 f_2	mm	$f_2=38$

续表

参数名称	单位	条件及数据计算
旋绕比 C		$C=13.7$
K		$K=\frac{4C-1}{4C-4}+\frac{0.615}{C}=1.104$
弹簧刚度 K_F	N/mm	根据 $d=2$，$D=16$ mm， 查表得 $P'=6.06$，则 $K_F=P'/n=1.5$
弹簧压缩量即工作行程 f	mm	$f=30$
自由高度 H_0	mm	$H_0=nt+1.5d=n(f_i+d)+1.5d$ 得 $H_0=48$
弹簧中径 D	mm	$D=Cd=22$
弹簧内径 D_1	mm	$D_1=D-d=22-1.6=20.4\approx 20$
弹簧外径 D_2	mm	$D_2=D+d=22+1.6=23.6\approx 24$
总圈数 n_1	圈	$n_1=n+1.5=5.5$
节距 t	mm	$t=\frac{H_0-1.5d}{n}=11.4$
间距 δ	mm	$\delta=t-d=9.8$
最大工作载荷 P_n	N	$P_n=K_F f=45$
高径比 b		$b=2.18$，安装要求不高

4）弹簧强度验算

为了满足在第一变形量时弹簧稳定性的要求，还需进行弹簧强度验算。同此前伞舱压缩弹簧的计算方法相似，取 S_p 为 1.3～1.7，带入相关参数，可得：

$$S=\frac{\tau_S}{\tau_{max}}=1.331\geqslant S_p$$

当弹簧设计、计算与材料选取符合要求时，设计满足要求。

5）缓冲作用量计算

基座承重压缩弹簧发生第二次变形时的弹性势能为：

$$\Delta U=\frac{1}{2}kf_2^2-\frac{1}{2}kf_1^2 \tag{2.22}$$

将弹簧参数带入式（2.22）中，可得：

$$\Delta U=\frac{1}{2}K_F f_2^2-\frac{1}{2}K_F f_1^2=495\ \text{N}\cdot\text{mm}$$

基座承重压缩弹簧缓冲作用的效率 I 为：

$$I=\frac{1}{A}\frac{\frac{1}{2}K_F f_2^2-\frac{1}{2}K_F f_1^2}{\frac{1}{2}mv^2}\times 100\%=6.25\% \tag{2.23}$$

从上述计算结果可知，该组弹簧虽能保证对 10 kg 的弹体上、中部组件的支撑力，但在弹体下落时，弹簧会被压缩到极限位置，缓冲效果不明显，还可能发生破坏，应当通过弹簧材料选择、弹簧制作工艺及热处理手段加以改进。

(3) 支撑板扭簧的设计

支撑板扭簧是智能作战机器人着陆展开扶正机构的关键零件，智能作战机器人着陆扶正机构由底部基座、支撑板、支撑板挂钩、支撑板扭簧等零件构成，其展开扶正工作过程为：弹体着陆展开前，支撑板挂钩与机器人发射筒卡槽处于形状锁合状态，智能作战机器人呈圆柱状（图 2.24），这时基座内的支撑板扭簧处于扭转变形状态，储存着扭转变形弹性能。当机器人着陆时，在瞬间冲击力作用下，智能作战机器人上、中部组件通过惯性下沉力使基座承重压缩弹簧变形，导致机器人上、中部组件下移，于是支撑板挂钩从机器人发射筒卡槽中解脱出来，在支撑板扭簧扭力作用下，支撑板向四周展开（图 2.25），通过扭转弹簧对支撑板的扭紧锁定作用，保证智能作战机器人即使在重心有所偏移的情况下，也能保持弹体稳定。由此可见，支撑板扭簧的工作变形角及所能提供的扭矩对机器人工作性能影响极大，应精心设计、严格计算。

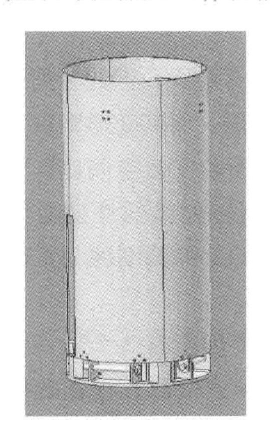


图 2.24　机器人闭合状态图

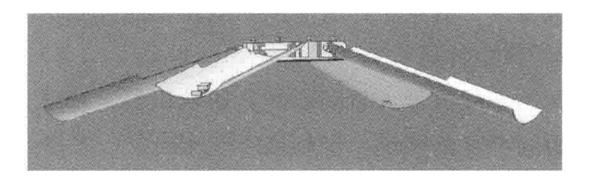


图 2.25　机器人底部展开状态图

根据智能作战机器人对着陆展开扶正装置的设计要求，支撑板扭簧需具备工作变形角大、储能时间长、结构尺寸小等特点，具体设计条件及要求如下：

① 支撑板扭簧从支撑板呈闭合形式到呈展开形式的自由扭转角大于 110°，即第一工作角与第二工作角之差大于 110°。

② 由于基座空间的限制，支撑板扭簧的许用工作空间较为狭窄，支撑板扭簧的允许设计高度须小于 56 mm，弹簧中径须小于 25 mm。

③ 要求在智能作战机器人降落着陆角不小于 70°的情况下，支撑板扭簧能通过对支撑板（支撑板长度约为 400 mm）的扭转作用，保证支撑板对弹体扶正功能的实现。

④ 支撑板扭簧扶正的弹体质量应减去已解脱的降落伞组件及基座底部的质量。

1）扭簧选型

扭簧根据其扭转形式主要可分为外壁式扭转弹簧、内壁式扭转弹簧及中心臂式扭转弹簧，根据其扭转结构又可分为直臂扭转弹簧、单臂弯曲扭转弹簧及双扭转弹簧。根据智能作战机器人对支撑板扭簧的尺寸限制及功能要求，选定并列双扭转弹簧作为支撑板扭簧。

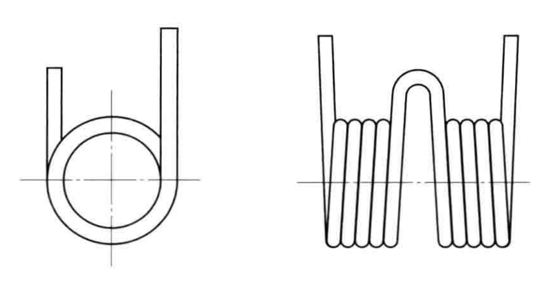


图 2.26 双扭簧基本结构示意图

① 并列双扭转弹簧的工作机理及简化模型。

图 2.26 所示的并列式双扭转弹簧（简称双扭簧）属于圆柱扭转螺旋弹簧，其制作材料一般采用普通弹簧钢丝，横截面多为圆形。该类型弹簧在机械工程中主要用于承压和储能，也可用作传动系统中的弹性元件等。

双扭簧是用一根弹簧丝材料在同一芯轴上向反方向缠绕而成的两个圈数相同的弹簧。两弹簧的中间为扣环，两个端头处为加载支点。每个弹簧由螺旋梁和两个等长直梁组成。

② 并列双扭转弹簧的特点。

从结构形式上来看，并列双扭转弹簧为两个单臂扭转弹簧组合而成，因此并列双扭转弹簧每个弹簧的刚度相当于以两个弹簧总长作为一个单簧时的 4 倍，而其变形则仅为两个单簧的 1/4。因此并列双扭转弹簧不仅作用效率高，同等扭矩下所需安装空间比其他结构形式的弹簧要小，且一般许用扭转工作角较大。此外，并列双扭转弹簧的性能稳定，在弹性范围内，其主工作方向的荷载位移曲线基本上是线性的，即其弹簧刚度为常量。

2）扭矩计算

智能作战机器人着陆瞬间，影响机器人着陆重心偏移的主要因素有 3 个，一是弹体着陆瞬间存在的摆动，但幅度不大于±5°；二是由于气流影响导致机器人存在的横向速度或加速度；三是着陆地面不平整。根据智能作战机器人的作战使命和设计需求，应综合考虑满足着陆角大于 70°，即垂直倾斜角不大于 20°的情况。

此外，还须考虑若智能作战机器人在扶正过程中处于最不利的情况时（即条件下处于单扭簧工作状态），扭簧也应保证弹体能够扶正。因此，所选并列双扭转弹簧其单个弹簧所能产生的最大扶正扭矩 T_1 应满足：

$$T_1 \geqslant \frac{1}{2} Lmg\sin(90° - \theta) \tag{2.24}$$

式中，L 为智能作战机器人整体长度；θ 为智能作战机器人着陆角度，$\theta \geqslant 70°$。将相关数据带入式（2.24），可得：

$$T_1 \geqslant 4\ 890\ \mathrm{N \cdot mm}$$

根据扭簧设计理论，设扭簧在第一变形角时需满足其扭矩：$T \geqslant 4\ 890\ \mathrm{N \cdot mm}$。

实际上，在计算扭矩作用时，可将双扭簧拆分为两个单臂扭簧进行扭矩计算，因此

单个单臂扭簧应满足：

$$T \geqslant 2\ 445\ \text{N} \cdot \text{mm} \tag{2.25}$$

于是，可将并列双扭簧的设计通过对其单臂扭簧的参数计算而完成。

3）初始参数条件选择与确定

经过分析和研究，可确定单臂扭簧初始条件，见表 2.10。

表 2.10　支撑板扭簧单臂扭簧初始条件一览表

参数名称	单位	条件及数据计算
弹体质量 M	kg	$M=13$
扭簧材料		根据结构紧凑性及扭矩要求，选择琴钢丝
弹簧类别	次数	$N=1:10^3$，Ⅲ类弹簧
弹簧间距 δ	mm	为增大扭矩，采用密绕弹簧 $\delta=0$

4）关键参数的选择

根据扭簧设计理论，扭簧的最大许用扭矩公式为：

$$T=\frac{\pi d^3}{32}[\sigma_b] \tag{2.26}$$

式中，$[\sigma_b]$ 为许用应力，Ⅲ类扭簧的 $[\sigma_b]$ 为 $0.8\sigma_b$，根据琴钢丝的极限应力与簧丝直径的关系，可查表得出满足式（2.26）的弹簧直径 $d \geqslant 2.5$ mm。查阅弹簧设计手册中琴钢丝直径表格，取 $d=2.6$ mm。

5）其他参数计算

根据表 2.10 所列初始条件，按照一般圆柱压缩弹簧的设计公式及经验，得到能够满足智能作战机器人支撑板扭簧设计要求的参数情况见表 2.11 所示。

表 2.11　支撑板扭簧参数一览表

参数名称	单位	条件及数据计算
簧丝直径 d	mm	$d=2.6$
旋绕比 C		扭转弹簧旋绕比一般为 4～16，由于设计空间限制，D 小于 25，因此 C 必须小于 $25/d=9$，且为使结构紧凑，取 $C=8$
弹簧中径 D	mm	根据旋绕比，取标注值 $D=22$
节距 t	mm	$t=\delta+d=d=2.6$
单臂有效圈数 n 单臂扭簧自由高度 H_0^1	圈 mm	并列式双扭簧允许宽度为 56 mm，则：$H_0^1=nt+2d\leqslant 28$ mm 扭转弹簧在工作时弹簧间隙会产生变化，为留有一定余量，取 $n=7$，则有： $H_0^1=nt+2d=24$

续表

参数名称	单位	条件及数据计算
第一变形角 φ_1	(°)	扭簧使用角度和扭矩之间的关系式为： $\varphi_1 \geqslant \frac{3\ 670nDT}{Ed^4}=146.8$，取 $\varphi_1=150$ 其中，E 为弹簧材料的弹性模量
自由角度	(°)	根据样机基座的空间条件，确定扭转弹簧的固定方式，其自由扭转角为 100
第一工作扭矩扭转角	(°)	250
弹簧刚度	N·mm/(°)	$T'=\frac{Ed^4}{3\ 670Dn}\approx 16.66$
K		$K=\frac{4C-1}{4C-4}+\frac{0.615}{C}=1.104$
第二变形量 φ_2	(°)	$\varphi_2=\varphi_1+110=270$
第二工作扭矩扭转角	(°)	360
并列双扭簧自由高度 H_0	mm	$H_0=2H_0^1=48$
弹簧内径 D_1	mm	$D_1=D-d=22-2.6=19.4\approx 19$
弹簧外径 D_2	mm	$D_2=D+d=22+2.6=24.6\approx 25$
总圈数 n_1	圈	$n_1=2(n+2)=18$

(4) 弹簧应力松弛的研究

伞舱压缩弹簧、基座承重压缩弹簧、支撑板扭簧是智能作战机器人着陆缓冲、伞舱解脱、弹体扶正等功能得以实现的关键弹性元件，通过对上述弹簧的设计工作发现，这3种弹簧在机器人着陆展开前，均有着压缩变形量或扭转变形量大的特点，并且智能作战机器人需要满足长期存储、时刻备战的战略要求。如何保证这些弹簧在长时间大变形的状态下，仍能保持应有的弹性，在关键时刻照样高质量完成相关作战任务，是非常重要的研究课题。众所周知，弹性元件在长时间大变形的状态下最容易产生的失效形式就是出现应力松弛现象，因而必须对防止弹簧出现应力松弛进行深入研究。

1) 应力松弛及其主要指标

在工程应用领域，应力松弛现象是普遍存在的，它主要存在于由金属材料制造的弹性元件或构件中，特别是那些长期处于压缩、拉伸或扭转状态下且储能较大的弹簧，应力松弛现象更是时有所见，应力松弛现象是此类弹簧失效的重要形式之一。应力松弛是在恒应变条件下，元件的应力随时间延续而减小的现象，零件抗应力松弛性能可看作是其在受力条件下长期工作的抗力指标。

在一定温度和一定初始应力条件下，弹簧出现应力松弛现象一般可分两个阶段，第一阶段时间较短，应力随时间延长而急剧下降；第二阶段时间稍长，应力随时间延续而缓慢降低，应力松弛率趋向恒定值。应力松弛曲线如图 2.27 所示。

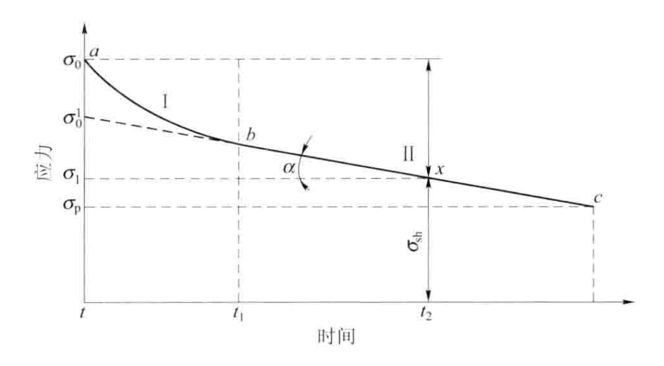


图 2.27　典型应力松弛曲线

弹簧的应力松弛特性一般由以下指标来衡量：

① 剩余应力 σ_{sh}。σ_{sh} 表示在初始应力作用下，经过规定时间 t 后，弹簧剩余应力的大小。它可用剩余应力与初始应力之比的百分数表示（公式（2.27）），用于表征材料抗应力松弛稳定性的好坏，σ_{sh} 值越大，表示弹簧的抗松弛性能越好。

$$\sigma_{sh}=\frac{\sigma_t}{\sigma_0}\times 100\% \tag{2.27}$$

② 应力松弛率 v_s。v_s 表示单位时间的应力下降值，即给定瞬间的应力松弛曲线的斜率（公式（2.28）），v_s 越小，表示弹簧的抗应力松弛性能越好。

$$v_s=\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}t} \tag{2.28}$$

弹簧的应力松弛率在应力松弛第一阶段明显大于第二阶段，即有 $v_{s1}>v_{s2}$。

③ 松弛稳定系数 S_0。在图 2.27 所示典型应力松弛曲线上，S_0 是松弛曲线的直线部分截止时间 t_1 的应力值 σ_0^1 与初始应力 σ_0 之比，即：

$$S_0=\frac{\sigma_0^1}{\sigma_0} \tag{2.29}$$

显然，S_0 越大，弹簧的抗松弛性能就越好。

④ 松弛速度系数 t_0。t_0 为弹簧应力松弛曲线第二部分的性能指标，其值为应力松弛率 v_s 的倒数，即有：

$$t_0=\frac{1}{\tan\alpha} \tag{2.30}$$

α 为松弛曲线的直线部分与时间坐标轴之间的夹角（图 2.27），α 角越小，t_0 越大，弹簧的抗松弛性能越好。

在设计弹簧时，只有根据弹簧的服役条件，综合考虑上述性能指标，才能全面系统

地评定弹簧材料及尺寸参数的抗应力松弛性能的好坏。

应力松弛特性的参数必须通过应力松弛试验来获得，然而应力松弛试验均要求在一定温度及恒应变等条件下进行，对系统精度、误差的要求也较高，试验持续时间也特别长，一般以 10^5 h以上计算。目前这种研究方法针对弹簧应力松弛领域的研究存在很大的局限性，难以获得针对不同类型、材料及参数的弹簧的相关应力松弛特性参数。因此，想通过具体的计算公式得出较为明确的有关具体参数确定的弹簧应力松弛特性指标非常困难。

2）弹簧提高抗应力松弛性能的研究

通过进一步研究发现，弹簧应力松弛与弹簧热处理、强压方法及表面强化等因素有重要关系，了解其中的关系可为智能作战机器人弹簧的优化设计提供实施途径。

弹簧材料的屈服极限、弹性极限和比例极限均为通过弹簧试验瞬时测得的重要参数，比例极限、弹性极限、屈服强度之间没有本质上的区别，它们均为弹簧材料在室温瞬时拉伸条件下产生微量塑性变形的抗力指标。这些参数对弹簧材料的化学成分、组织状态、工作稳定和加载速度等因素都十分敏感。而应力松弛参数为长时间积累和分析所得，由此可见，应力松弛参数是弹簧材料的屈服极限、弹性极限和比例极限等参数不断积累的结果。在弹性变形范围内，由于承载时间的延长，弹簧材料内部将通过位错运动使弹性变形逐步变为微塑性变形，微塑性变形量的积累便可变成永久变形。因而通过合金化、热处理、强压处理、表面强化等措施均可以大幅度改变弹簧应力松弛现象，有利于提高智能作战机器人所用各种弹簧的抗应力松弛性能。结合长期研究积累的经验，提出以下几种思路，以增强智能作战机器人三组弹簧的抗应力松弛特性。

① 通过合理的去应力退火提高弹簧抗应力松弛特性。

冷卷弹簧必须通过适当的退火，降低钢丝中存在的内应力，稳定弹簧尺寸并提高材料的弹性极限和弹性稳定性，因此通过适当的退火，可以提高弹簧材料的弹性极限，有助于提高弹簧抗应力松弛性能。不同材料、不同类型的弹簧，其最适宜的退火温度有所不同，需要根据具体材料进行调整。例如，冷拔碳素弹簧钢丝的退火温度范围为200 ℃～380 ℃，在该范围内，根据弹簧类型选择最佳退火温度，能有效增大弹簧材料的弹性极限，使弹簧具有良好的抗应力松弛特性。

② 通过合理的强压处理提高弹簧抗应力松弛特性。

根据金属塑性变形原理，在弹簧弹性极限以内加载然后卸载，弹簧会回复原位而不会发生永久变形。如果所加载荷超过了该材料的弹性极限至屈服点，就会产生微塑性变形，逐渐累积则成永久变形。通过强压处理的弹簧，可选取较高的设计应力，既能提高弹簧的疲劳寿命，又能显著改善弹簧的抗应力松弛性能。

对于圆柱压缩螺旋弹簧，强压处理方法包括冷强压、热强压、电强压、热磁强压等，不同类型的弹簧及材料需采用不同的强压处理方法，这样才能获得最优抗应力松弛性能。智能作战机器人所用弹簧的材料是65Mn钢丝，其经过热强压处理的抗应力松弛

性能最好。

③ 通过合理的热处理手段提高弹簧抗应力松弛特性。

热处理是增强弹簧相关特性的重要手段之一，热处理主要分为调质热处理（如淬火和回火等）、恒温热处理（如等温淬火、分级淬火等）以及形变热处理。对于普通碳素钢来说，恒温淬火热处理能较大幅度地提高弹簧抗应力松弛性能。该方法可运用于智能作战机器人弹簧组件。

④ 通过喷丸处理提高弹簧抗应力松弛特性。

喷丸处理也称喷丸强化，属于弹簧表面强化手段之一，也是提高零件疲劳寿命、抗应力松弛性能的有效方法之一。喷丸处理就是将高速弹丸流喷射到弹簧表面，使弹簧表层发生塑性变形，形成一定厚度的强化层，而强化层内有较高的残余应力。由于弹簧表面压应力的存在，当弹簧承受载荷时，可以抵消一部分抗应力，从而提高了弹簧的抗应力松弛特性。该方法也适用于提升智能作战机器人三组弹簧的抗应力松弛特性。

2.3　原理样机的仿真分析

2.3.1　仿真分析的对象与方法

经过前期工作，智能作战机器人的结构设计已经完成，且已利用三维设计软件建立了相关的零件和装配模型，下一步便是要在多体动力学软件 Adams 中进行一些有关智能作战机器人运动学、动力学的分析，消除设计缺陷，改进设计不足，完善原理样机。

Adams 是一款由美国 MDI 公司开发的机械系统动力学仿真分析软件，其求解器采用多刚体动力学理论中的拉格朗日方程方法，建立系统动力学方程，可对虚拟机械系统进行静力学、运动学和动力学分析，输出位移、速度、加速度和反作用力曲线。

在 Adams 软件中，机械系统的自由度决定了该机械系统的分析类型，即是进行运动学分析，还是进行动力学分析。

当 DOF=0 时，对系统进行运动学分析，这时仅考虑系统的运动规律，而不考虑产生运动的外力的影响。在运动学分析中，当某些构件的运动状态确定后，其余构件的位移、速度和加速度等随时间变化的规律，不是根据牛顿定律来确定的，而是完全由系统内构件间的约束关系来确定的，是通过位移的非线性代数方程与速度、加速度的线性代数方程迭代运算解出的。

当 DOF>0 时，对系统进行动力学分析，即分析其运动是由于保守力和非保守力的作用而引起的，并要求构件运动不仅满足约束要求，而且要满足给定的运动规律。它又包括静力学分析、准静力学分析和瞬态动力学分析。动力学的运动方程就是机构中运动的拉格朗日乘子微分方程和约束方程组成的方程组。

当 DOF<0 时，属于超静定问题，Adams 无法解决。

1. **动力学分析**

(1) 广义坐标的选择

动力学方程的求解速度很大程度上取决于广义坐标的选择。研究刚体在惯性空间中的一般运动时，可以用其连体基的圆点（一般与质心重合）确定位置，用连体基相对惯性基的方向余弦矩阵确定方位。为了解析地描述方位，必须规定一组转动广义坐标表示方向余弦矩阵。

Adams 软件用刚体 i 的质心笛卡尔坐标和反映刚体方位的欧拉角作为广义坐标，即 $\boldsymbol{q}_i=[x,y,z,\psi,\theta,\varphi]_i^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{q}=[\boldsymbol{q}_1^{\mathrm{T}},\boldsymbol{q}_1^{\mathrm{T}},\cdots,\boldsymbol{q}_n^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$。由于采用了非独立的广义坐标，系统动力学虽然是最大数量，但却是高度稀疏耦合的微分代数方程，适用于采用稀疏矩阵方法进行高效求解。

(2) 动力学方程的建立

Adams 程序采用拉格朗日乘子法建立系统运动方程：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}\right)^{\mathrm{T}}-\left(\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{q}}\right)^{\mathrm{T}}+\varphi_q^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\rho}+\theta_q^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\mu}=\boldsymbol{Q} \tag{2.31}$$

其完整约束方程为：

$$\varphi(\boldsymbol{q},t)=0 \tag{2.32}$$

非完整约束方程为：

$$\theta(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},t)=0 \tag{2.33}$$

式中，T 为系统动能；$\boldsymbol{q}$ 为系统广义坐标列阵；$\boldsymbol{Q}$ 为广义力列阵；$\boldsymbol{\rho}$ 为对应于完整约束的拉氏子列阵；$\boldsymbol{\mu}$ 为对应于非完整约束的拉氏子列阵。

(3) 动力学方程的求解

一般形式的系统运动方程如下式所示：

$$\begin{cases}F(\boldsymbol{q},\boldsymbol{u},\dot{\boldsymbol{u}},\boldsymbol{\lambda},t)=0\\ G(\boldsymbol{u},\dot{\boldsymbol{q}})=\boldsymbol{u}-\dot{\boldsymbol{q}}=0\\ \dot{\boldsymbol{\lambda}}_{j+1}\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{q},t)=0\end{cases} \tag{2.34}$$

式中，$\boldsymbol{q}$ 为广义坐标列阵；$\dot{\boldsymbol{q}}$ 和 $\boldsymbol{u}$ 为广义速度列阵；$\boldsymbol{\lambda}$ 为约束反力及作用力列阵；F 为系统动力学微分方程及用户定义的微分方程（如用于控制的微分方程、非完整约束方程等）；$\boldsymbol{\Phi}$ 为描述约束的代数方程列阵。

在进行动力学分析时，Adams 采用两种算法：一是提供三种功能强大的变阶、变步长积分求解程序（GSTIFF 积分器、DSTIFF 积分器和 BDF 积分器）来求解稀疏耦合的非线性微分代数方程，这种方法适用于模拟刚性系统（特征值变化范围大的系统）；二是提供 ABAM 积分求解程序，采用坐标分离算法来求解独立坐标的微分方程，这种方法适于模拟特征值经历突变的系统或高频系统。

2. **运动学分析**

运动学分析研究零自由度系统的位置、速度、加速度和约束反力，因此只需求解系

统的约束方程：

$$\Phi(\boldsymbol{q},t_n)=0 \tag{2.35}$$

任意时刻 t_n 时系统的位置就可由约束方程 Newton-Raphson 通过迭代求得，即有：

$$\left[\frac{\partial \boldsymbol{\Phi}}{\partial \boldsymbol{q}}\right]_j \Delta \boldsymbol{q}_j=-\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{q}_j,t_n) \tag{2.36}$$

式中，$\Delta \boldsymbol{q}_j=\boldsymbol{q}_{j+1}-\boldsymbol{q}_j$，$j$ 表示第 j 次迭代。

t_n 时刻系统的速度、加速度可由约束方程求一阶、二阶时间导数得到，即有：

$$\left(\frac{\partial \boldsymbol{\Phi}}{\partial \boldsymbol{q}}\right)_j \dot{\boldsymbol{q}}=-\frac{\partial \boldsymbol{\Phi}}{\partial t} \tag{2.37}$$

$$\left(\frac{\partial \boldsymbol{\Phi}}{\partial q}\right)_j \ddot{\boldsymbol{q}}=-\left\{\frac{\partial^2 \boldsymbol{\Phi}}{\partial t^2}+\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\frac{\partial^2 \boldsymbol{\Phi}}{\partial \boldsymbol{q}_k \partial \boldsymbol{q}_l}\dot{\boldsymbol{q}}_k\dot{\boldsymbol{q}}_l+\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial \boldsymbol{\Phi}}{\partial \boldsymbol{q}}\right)\dot{\boldsymbol{q}}+\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}}\left(\frac{\partial \boldsymbol{\Phi}}{\partial t}\right)\dot{\boldsymbol{q}}\right\} \tag{2.38}$$

t_n 时刻系统的约束反力可由带乘子的拉格朗日方程得到，即有：

$$\left(\frac{\partial \boldsymbol{\Phi}}{\partial \boldsymbol{q}}\right)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\lambda}=\left\{-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}\right)^{\mathrm{T}}+\left(\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{q}}\right)^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Q}\right\} \tag{2.39}$$

2.3.2　虚拟样机分析

虚拟样机技术是一门综合性技术，其核心部分是多体系统运动学与动力学建模理论及其技术实现。CAD/FEA 技术的发展为虚拟样机技术的应用提供了良好的技术环境和有力的技术支撑。虚拟样机技术改变了传统的设计思想，将分散的零部件设计和分析技术集成于一体，提供了一个全新的研发机械产品的设计方法。

通过计算机技术建立产品的数字化模型，可以完成无数次物理样机无法进行的虚拟试验，从而无须制造及试验物理样机就可获得最优方案，因此，不但减少了物理样机的数量，而且缩短了研发周期，提高了产品质量。正是由于虚拟样机技术所具有的这些特点，使其得到了广泛的应用。

1. 简化模型的准备

在三维设计软件中完成机械结构实体造型后，可借助相关软件接口在 Adams 中建立虚拟样机。由于使用的三维设计软件为 CATIA，要与 Adams 实现数据连通，可借助 Simdesigner。需要指出的是，在进行数据连通时，往往会碰到一些问题。比如说坐标系在设计软件和仿真软件中不一致，这样会给用户在仿真环境中添加各种约束和坐标带来一些意想不到的麻烦。解决这一问题的方法是在 CATIA 装配模型时（由于设计分析时采用的是 CATIA＋Simdesigner＋Adams，故以此为例来说明），第一个基准件不和地面添加固定约束，以原始坐标为准，对其他零件则施加约束。在研究过程中还发现，如果在 Simdesigner 中没有对某个零件添加约束，那么在导入 Adams 中该零件数据就会丢失。同时，Adams 所涉及的工作目录和文件都不能包含中文和空格，否则将会导致错误。在建立虚拟样机模型时，可以适当删去某些不重要零件来简化模型，以减少计

算时间。在成功导入 Adams 之后，需要添加各种约束和物理特性。具体情况如图 2.31 所示。

2. 相关参数的设定

在 Adams 虚拟样机仿真分析环境中，可先简化仿真模型，假定智能作战机器人落到硬质地面上，并在水平方向上无初速度。虚拟环境的参数设置情况见表 2.12 和表 2.13，弹簧刚度则由计算获得。

表 2.12 不同材料之间的接触参数

参数名称	铝(干)一地（干）	橡胶（干)一地（干）
刚度	35 000	2 855
阻尼	28	0.57
力指数	1.5	1.1
穿透深度	0.1	0.1
静摩擦系数	0.25	0.25
动摩擦系数	0.2	0.2
静摩擦速度	0.1	0.1
动摩擦速度	10	10

表 2.13 相关弹簧参数一览表

参数名称	支撑板扭簧	基座承重压缩弹簧
刚度	33.35 N·mm/（°）	5.4 N/mm
预载荷	3 335 N·mm	27 N

3. 虚拟样机的建立

经过模型简化和参数设定，可建立虚拟样机模型，如图 2.28 所示。

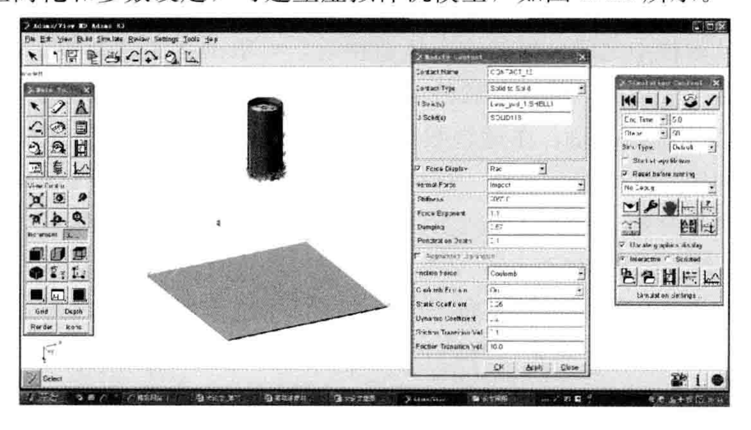


图 2.28 智能作战机器人虚拟样机模型

2.3.3　一代原理样机结构设计的思考与改进

一代原理样机验证智能作战机器人总体设计方案的可行性与系统整体功能的完备性。从结构设计的角度进行考察，在一代原理样机的研制过程中，主要完成机器人结构系统、传动系统、探测子系统运动云台俯仰和周转运动机构及着陆展开扶正机构的设计、制作、装配、调试与试验等工作，还完成了机器人总体结构的静力学、运动学及动力学相关参数的分析与校核。经测试，智能作战机器人一代原理样机的技战术指标符合使用条件、实际环境和洞库作战的客观需求，达到预期的研究目标。为了进一步提高智能作战机器人的研制水平，在一代原理样机取得成功的基础上，对其又进行了结构优化与性能改良，通过对样机相关结构的深刻剖析与深入理解，智能作战机器人结构设计时需要重点考虑体积与重量问题，换言之，即在智能作战机器人各个子系统设计时必须综合考虑其体积、重量以及相互关联的若干问题。例如，在控制子系统及电源子系统选型时，必须综合考虑系统所能提供的驱动力和各元件体积形状是否能在合理布局且有效固定的基础上满足机器人关于结构紧凑、体积小巧、质量轻盈的设计要求。

通过对智能作战机器人一代原理样机结构子系统的装配关系、调试效果以及运作过程的相关实验，证明智能作战机器人一代样机在结构设计上的合理性，同时也发现一些还可改进与提高的地方。根据驱动实验所得的相关数据，重点进行控制子系统和电源子系统结构支撑部分的改进设计工作，还进行驱动器件、电源器件的选型，具体结果见表 2.14。

表 2.14　驱动器件、电源器件选型情况一览表

所属	名称	数量	型号	质量	尺寸/mm
控制子系统	周转驱动电动机	1	两相混合步进电动机 42BYG250CS	0.36 kg	42×42×48+ ϕ5×24
控制子系统	俯仰驱动电动机	1	两相混合步进电动机 42BYG250CS	0.36 kg	42×42×48+ ϕ5×24
控制子系统	电动机驱动板	2	YKA2204MA	0.13 kg	96×56.5×21
控制子系统	中央控制器	1	ICETEK－DM6437－B	0.24 kg	120×100×22
电源子系统	电池	7～10	国产电池 2 200 mAh	0.026 kg/节	ϕ18×65
电源子系统	变压模块	1	WS05－24S05	0.05 kg	25×25×15
电源子系统	变压模块	2	WS05－24S12	0.05 kg	25×25×15

智能作战机器人控制子系统及电源子系统布局设计时主要应考虑以下三方面的问题：一是各器件的相互位置和连接方式，如电动机与电动机驱动板的位置布置和相关的线路连接及电源供电连接线的走线等；二是各器件的整体布局和电磁干扰，尽量保证结

构紧凑、线路简短、无干扰、不干涉、传动效率高、整体构形美；三是各部件的装配调试和使用维护，各器件的安装、调整、维修应简捷高效。

结合以上问题的思考，具体处置措施为：一是准确确定智能作战机器人传动系统的安装位置和结构尺寸，如驱动电动机、传动齿轮、蜗杆等；二是准确确定智能作战机器人主要控制和驱动板卡的安装位置和结构尺寸，如中央控制板、电动机驱动板等；三是准确确定电源子系统及变压模块的安装位置和结构尺寸。在上述处置完成之后，最终通过软件仿真技术获得虚拟样机结构布置形式，如图 2.29 所示。

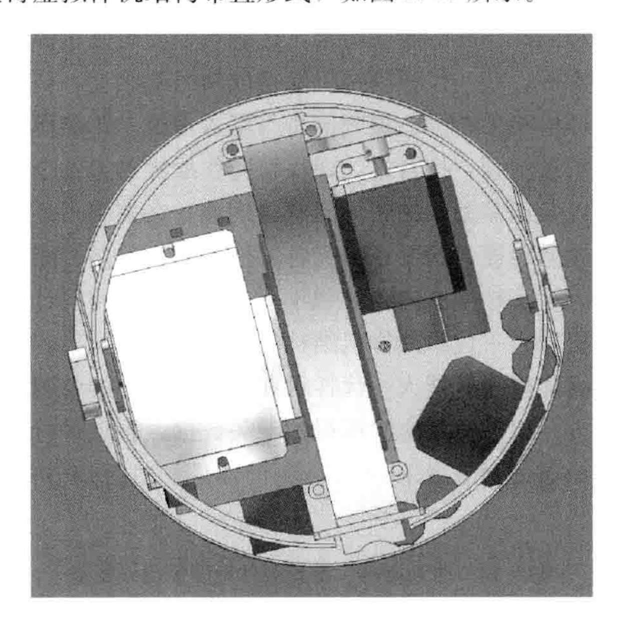
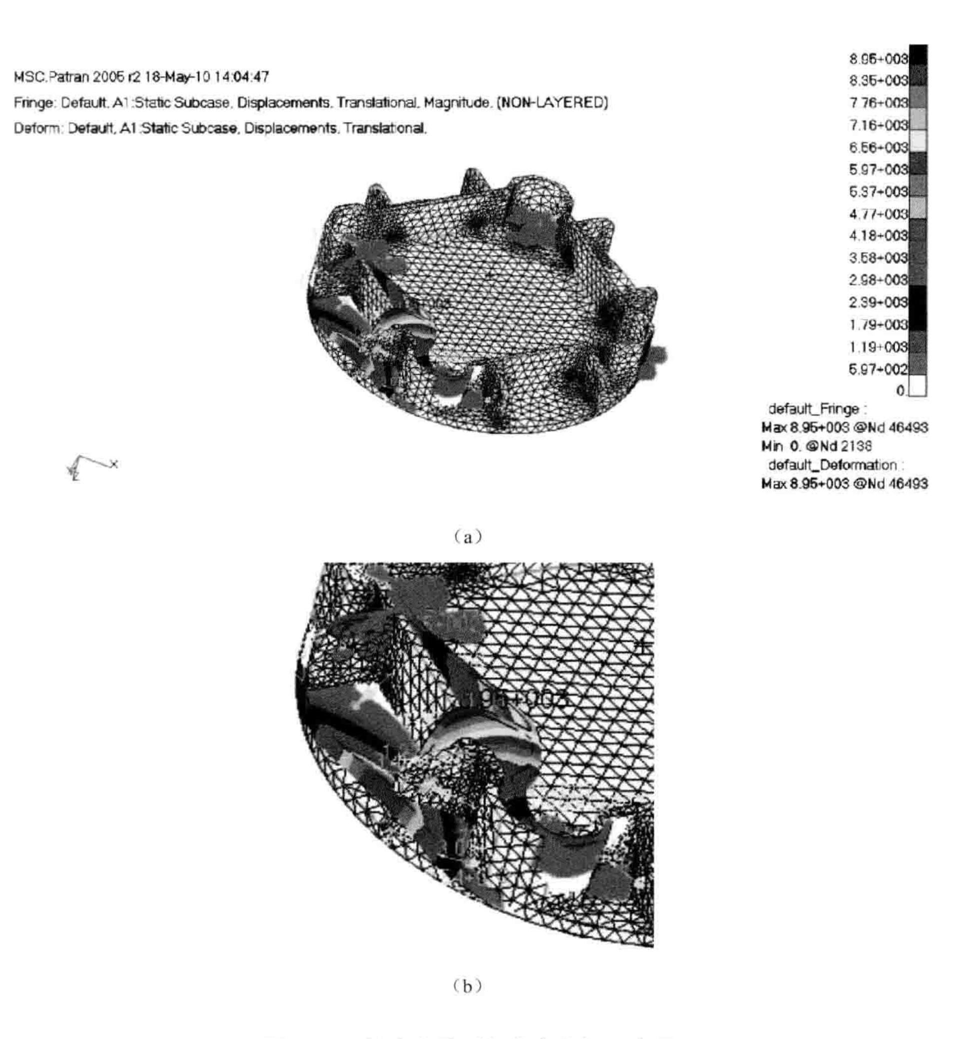


图 2.29 智能作战机器人驱动、传动、控制、电源子系统布局造型图

通过对智能作战机器人驱动、传动、控制、电源子系统的布局设计，对一代样机中部组件的结构形式进行了优化设计与科学调整，主要改进如下：一是通过拟实造型与仿真分析相结合，尝试多种结构设计方案，发现若能将一代样机中的周转运动驱动蜗杆安装高度向上提升，就能有效增大机器人内部许用空间，从而可将各个子系统更好地集成在一起；二是通过合理安排中央处理器、电动机驱动板支架、齿轮支架等的位置，可显著提高结构系统的刚性和稳定性。

2.3.4 基座的仿真分析

总体结构静力学仿真分析是现代结构设计必须进行的工作之一。智能作战机器人一代原理样机在仿真设计阶段完成对其主要支撑部件的静力学分析，并在此基础上进行结构的改进与完善。由于智能作战机器人基座是着陆瞬间承受冲击的首要部件，为保证其具有相应的强度，因而利用 Adams 仿真软件对该基座进行了相关的仿真分析。基座取铝合金材料并设为柔性体，着陆瞬间基座所受应力的仿真情况如图 2.30 所示。



(a)

(b)

图 2.30　基座着陆瞬间应力分析示意图

(a) 仿真分析界面示意图；(b) 局部细节示意图

由图 2.30 可知，基座首先触地一侧的位置所受应力最大，其最大值为 8 950 N，该数值超过了基座材料的耐冲极限，基座将由此造成损坏，因而必须对基座结构进行优化或对基座材料进行改换，以提高基座强度。具体改进措施有两个：一是将基座材料由铝材改为钢材，这一方面能提高基座的抗冲击能力，另一方面又能降低机器人重心，有利于提高机器人着陆的稳定性，但缺点是机器人重量将因此而增加；二是增大基座底面的厚度，这样处置的优点是提高了基座抗冲击的能力，缺点是增加了机器人的重量和高度。两相权衡，最终决定采用第一种处置方案。

为了了解改进设计后的效果，将改进设计后的基座导入 Pro/ENGINEER，进行了相关的有限元仿真分析，并获得如图 2.31 所示的分析结果。

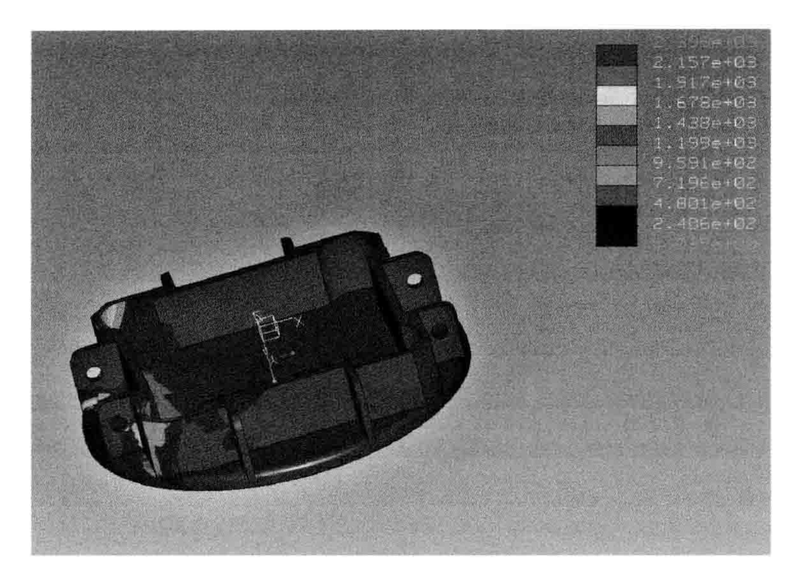


图 2.31 基座有限元应力分析图

由图 2.31 可知，改进设计后，基座着陆时受冲击一侧的最大应力降到了 2 396 N，只有先前的 1/4，基座材料能够承受。这表明通过改进设计，已达到增加基座抗冲击强度的效果。

2.3.5 支架杆的仿真分析

支架杆在智能作战机器人中负责支撑机器人发射筒等上部组件，保证机器人发射筒及装置在其上的视觉观瞄器件、助推火箭成功履行其工作使命，且还须保证机器人发射筒组件能在支架杆水平轴线上顺畅、平稳地完成俯仰运动，因而其作用十分重要。在智能作战机器人着陆展开过程中，地面对整个装置的冲击力可能会导致支架杆产生弯曲变形，甚至发生断裂破坏，这样就势必会影响智能作战机器人开展图像采集、洞库搜索、目标定位、瞄准攻击等工作，以致其失去其反洞库目标作战功能。为此，利用有限元技术对支架杆进行了仿真分析，以避免不利情况的出现。

1. 支架杆相关参数的确定

通过分析与计算，可确定利用有限元技术开展仿真分析所需支架杆相关信息与参数如下：

质量：$8.016\,687\,514\,3\times10^{-5}$ t；

惯量：IXX：$6.887\,622\,472\,4$ t • mm^2；

IYY：$6.892\,675\,174$ t • mm^2；

IZZ：$5.793\,959\,985\,2\times10^{-3}$ t • mm^2；

IXY：$4.897\,965\,388\,9\times10^{-9}$ t • mm^2；

IZX：1.661 612 232×10^{-9} t·mm^2；

IYZ：2.099 001 708 1×10^{-2} t·mm^2。

2. **支架杆模态振型的确定**

利用 Patran/Nastran 生成了支架杆的前 10 阶模态，模态频率见表 2.15，一阶和十阶模态则如图 2.32 和图 2.33 所示。

表 2.15　支架杆模态频率一览表

阶数	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶
频率/Hz	241.3	1 132	1 708.6	2 501.8	3 428.7
阶数	六阶	七阶	八阶	九阶	十阶
频率/Hz	4 643.3	6 050.1	7 324.6	8 285.7	8 652.3

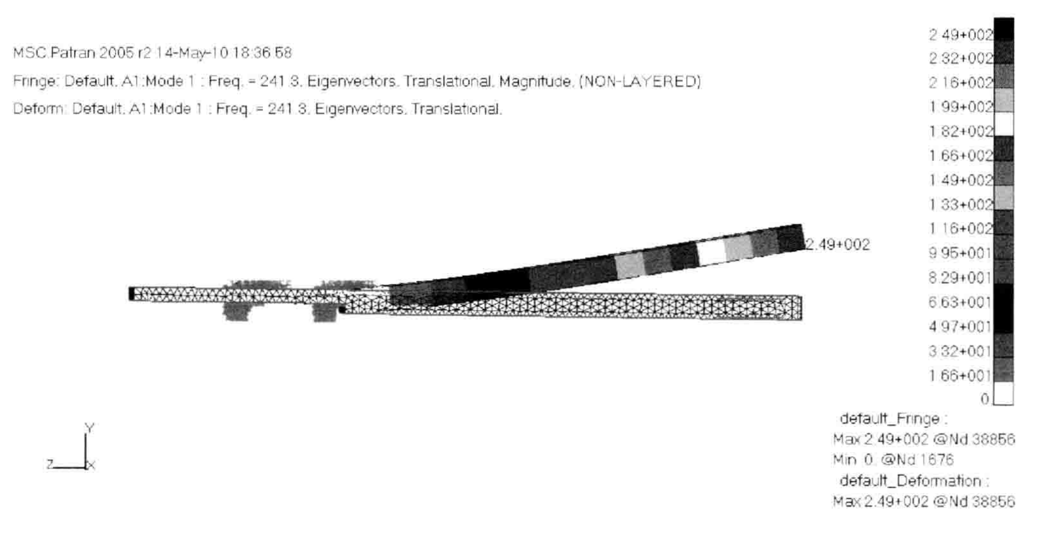


图 2.32　一阶模态

由图 2.32 和图 2.33 可知，一阶为弯曲变形，十阶为扭转变形。事实上，二阶、三阶和五阶也为弯曲变形，其余各阶则为扭转变形。

3. **支架杆质心位移的仿真分析**

在智能作战机器人着陆、展开、扶正过程中，支架杆均可视为柔性体来处理。当智能作战机器人经抛撒时，支架杆在下落过程中其质心位移如图 2.34 和图 2.35 所示，与刚性体时有较大差异，其应变能情况如图 2.36 所示。

4. **支架杆承受载荷的仿真分析**

在 Adams 中使用柔性体仿真，为的是得到支架杆在整个过程中所受的载荷，进而导出载荷文件，再放到 Patran 中进行载荷步分析，这是因为若将 Adams 和 Patran 结合起来使用，就能避免各自不足，发挥各自所长，得到较好的仿真分析效果。



图 2.33 十阶模态

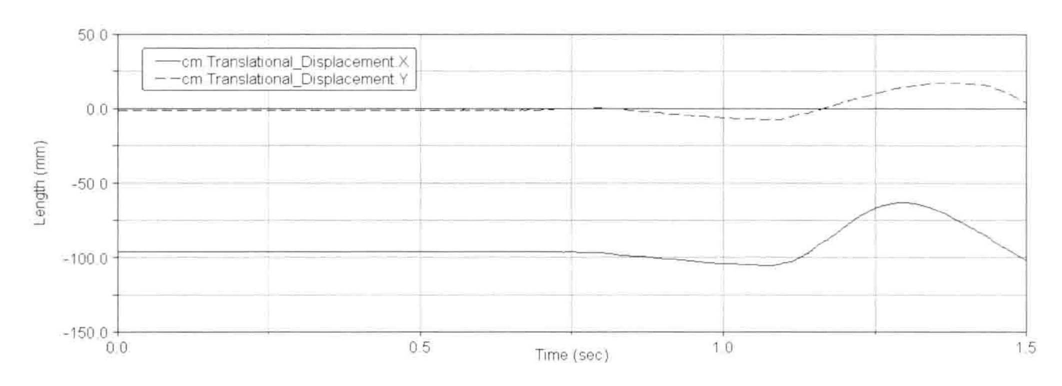


图 2.34 支架杆质心在 *X*、*Y* 方向上的位移情况

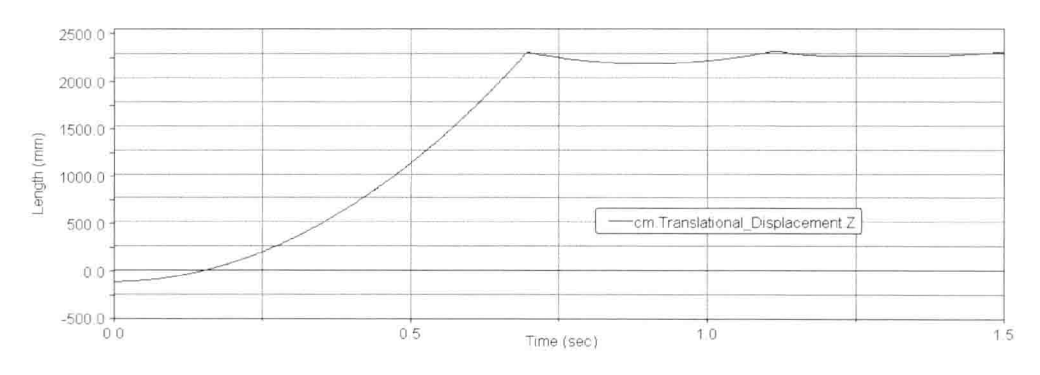


图 2.35 支架杆质心在 *Z* 方向上的位移情况

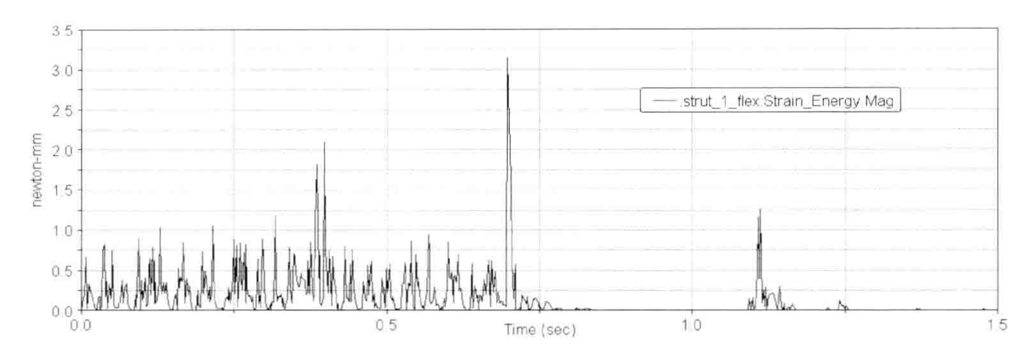
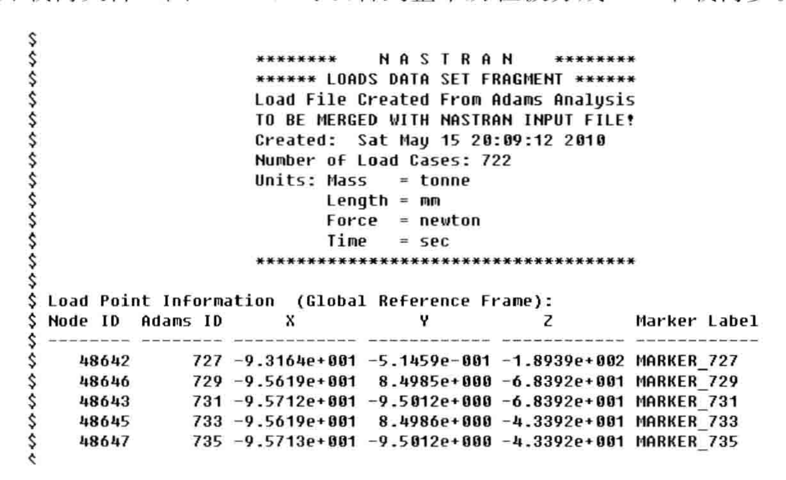


图 2.36　支架杆应变能情况示意图

在 Adams 环境中，可通过单击 File→Export→File Type（FEA Loads）进行设定，当设定完成后，可得到支架杆的 .lod 文件，该文件包含了支架杆在整个仿真过程中的载荷。打开载荷文件（图 2.37），可以看到整个历程被分成 722 个载荷步。



```
$
$                       ********    N A S T R A N    ********
$                       ****** LOADS DATA SET FRAGMENT ******
$                       Load File Created From Adams Analysis
$                       TO BE MERGED WITH NASTRAN INPUT FILE!
$                       Created:  Sat May 15 20:09:12 2010
$                       Number of Load Cases: 722
$                       Units: Mass   = tonne
$                              Length = mm
$                              Force  = newton
$                              Time   = sec
$                       *************************************
$
$ Load Point Information  (Global Reference Frame):
$ Node ID  Adams ID       X            Y            Z        Marker Label
$ -------- -------- ------------ ------------ ------------ ------------
$    48642      727 -9.3164e+001 -5.1459e-001 -1.8939e+002 MARKER_727
$    48646      729 -9.5619e+001  8.4985e+000 -6.8392e+001 MARKER_729
$    48643      731 -9.5712e+001 -9.5012e+000 -6.8392e+001 MARKER_731
$    48645      733 -9.5619e+001  8.4986e+000 -4.3392e+001 MARKER_733
$    48647      735 -9.5713e+001 -9.5012e+000 -4.3392e+001 MARKER_735
$
```

图 2.37　支架杆的载荷文件

根据图 2.36 所示支架杆应变能的分布情况可知，支架杆在 0.697 4 s 时刻有最大应变能，其数值为 3.5 N·mm。该时刻对应的载荷步情况如图 2.38 所示。此后，可在图 2.39 所示载荷文件中找到该时刻对应的载荷信息。

5. **支架杆的应力分析**

将上述载荷添加到支架杆上，得到支架杆位移变形云纹图和应力分布图分别如图 2.40 和图 2.41 所示。

从图 2.42 和图 2.43 可以看出，支架杆最大位移为 8.55×10^{-2} mm，支架杆最大应力为 1.14×10^{2} MPa。查机械设计手册相关表格，得知硬铝的许用应力为 375 MPa，支架杆最大应力在材料许用应力范围内，满足强度设计要求。由此表明，智能作战机器人支架杆的材料选择和参数设计符合实际使用需求，其设计方案是可靠、可行的。

```
SUBCASE 343
        LOAD= 343
        OLOAD(SORT1,PRINT)=ALL
        SUBTITLE = ADAMS SIM TIME =  6.9226e-001
SUBCASE 344
        LOAD= 344
        OLOAD(SORT1,PRINT)=ALL
        SUBTITLE = ADAMS SIM TIME =  6.9488e-001
SUBCASE 345
        LOAD= 345
        OLOAD(SORT1,PRINT)=ALL
        SUBTITLE = ADAMS SIM TIME =  6.9742e-001
SUBCASE 346
        LOAD= 346
        OLOAD(SORT1,PRINT)=ALL
        SUBTITLE = ADAMS SIM TIME =  7.0000e-001
SUBCASE 347
        LOAD= 347
        OLOAD(SORT1,PRINT)=ALL
        SUBTITLE = ADAMS SIM TIME =  7.0013e-001
SUBCASE 348
        LOAD= 348
        OLOAD(SORT1,PRINT)=ALL
        SUBTITLE = ADAMS SIM TIME =  7.0266e-001
```

图 2.38　0.697 4 s 时刻对应的载荷步情况

```
$
$ LOAD CASE = 345
$
GRAV    ,  11033,, -1.0,       1959617.0,       840865.53,      -503083.55
RFORCE  ,  11034,,,-1.0,      0.11350558,      0.29517695,     -0.13296972,2
RFORCE  ,  11035,,, 0.0,       387.49677,      -936.48339,       390.65171,2,+RF11035
+RF11035,-1.0
FORCE   ,  11034,   48642,,  1.0,      -17.168091,      -7.1048311,       10.476209
MOMENT  ,  11035,   48642,,  1.0,      -73.318933,       12.571709,      -122.70382
FORCE   ,  11034,   48646,,  1.0,       38.968883,       32.511681,       90.717831
MOMENT  ,  11035,   48646,,  1.0,       853.90454,      -119.09483,      -149.12988
FORCE   ,  11034,   48643,,  1.0,       46.876885,       12.291829,      -160.19647
MOMENT  ,  11035,   48643,,  1.0,       520.47992,      -153.71221,       58.211231
FORCE   ,  11034,   48645,,  1.0,      -19.424420,      -12.634641,       36.985806
MOMENT  ,  11035,   48645,,  1.0,      -10.239738,      -8.4014920,       41.494786
FORCE   ,  11034,   48647,,  1.0,      -28.572178,      -14.063017,      -18.243791
MOMENT  ,  11035,   48647,,  1.0,      -106.90581,      -22.042497,       32.322329
LOAD    ,    345, 1.0, 1.0,11033, 1.0,11034, 1.0,11035
```

图 2.39　载荷信息



图 2.40　支架杆位移变形云纹图

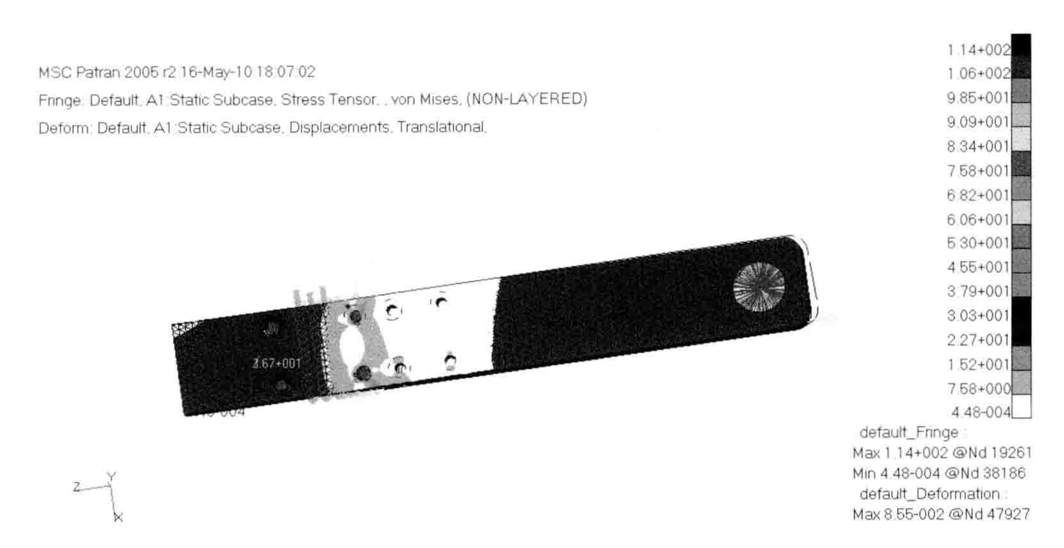


图 2.41　支架杆应力分布图

2.3.6　弹簧的仿真分析

随着科学技术的不断发展，计算机辅助设计技术越来越广泛地应用于各种设计领域，并已从二维图纸电子化框架技术转化为以三维实体建模、动力学模拟仿真和有限元分析为主的机械系统动态仿真技术。目前，采用 Adams 软件开展仿真分析的研究对象主要是机械系统运动学和动力学分析，用以确定系统及其构件在任意时刻的位置、速度和加速度，并由此确认各部件是否满足设计要求。

1. 基座承重压缩弹簧仿真

按照上述方法和步骤，可得基座承重压缩弹簧受力和变形仿真分析结果如图 2.42 和图 2.43 所示。

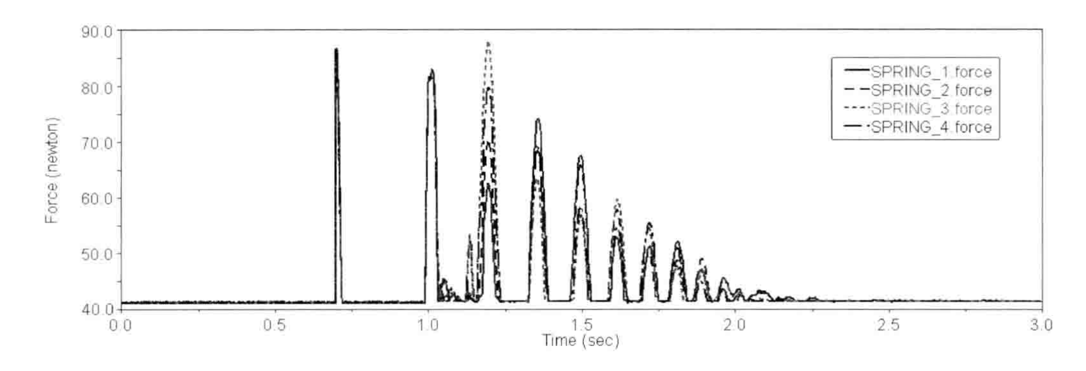


图 2.42　基座承重压缩弹簧受力分布图

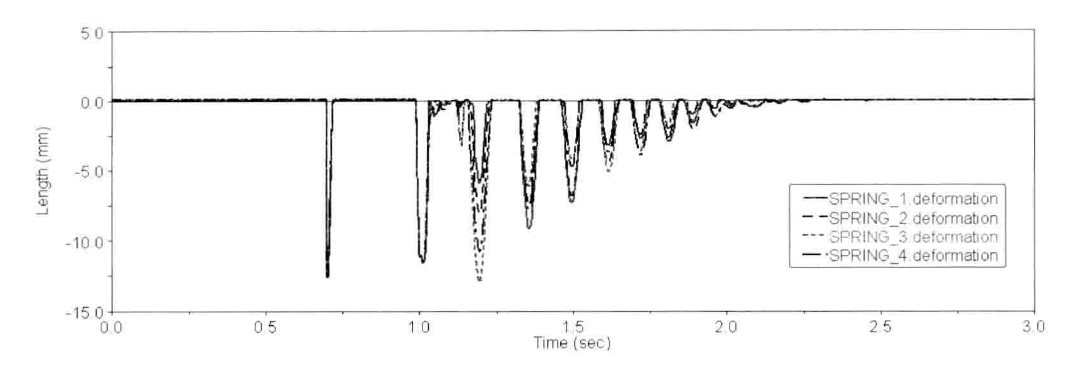


图 2.43 基座承重压缩弹簧压缩变形分布图

由图 2.42 和图 2.43 可以看出，基座承重压缩弹簧在着陆过程中，由于智能作战机器人在冲击力的作用下，因重心不稳和着陆角的关系，基座承重压缩弹簧的受力及压缩量各不相同，且弹簧的最大压缩量约为 13 mm，最大受力值接近 90 N，而根据前述设计的分析结果，基座承重压缩弹簧的二次压缩变形量最大约为 10 mm，弹簧压并高度为 8 mm，因此该弹簧极有可能被压坏，需要采取一定的措施来防范或改进。

2. 支撑板扭簧仿真

采用前述方法与步骤对支撑板扭簧进行扭矩和变形的仿真分析，可得仿真分析结果如图 2.44 和图 2.45 所示。

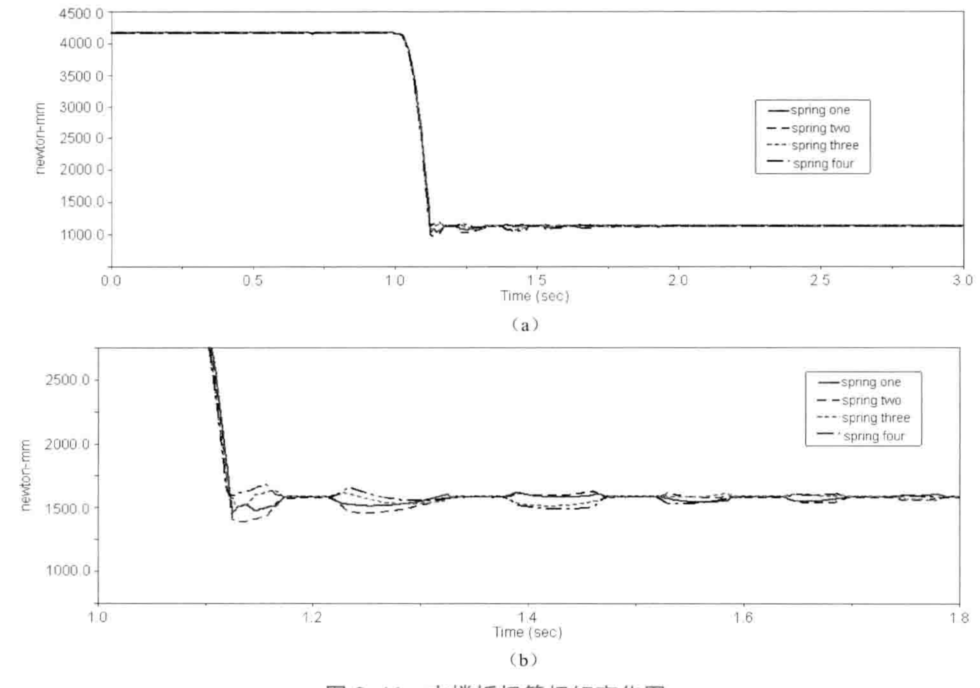


图 2.44 支撑板扭簧扭矩变化图

(a) 扭矩变化全局示意图；(b) 扭矩变化局部放大图

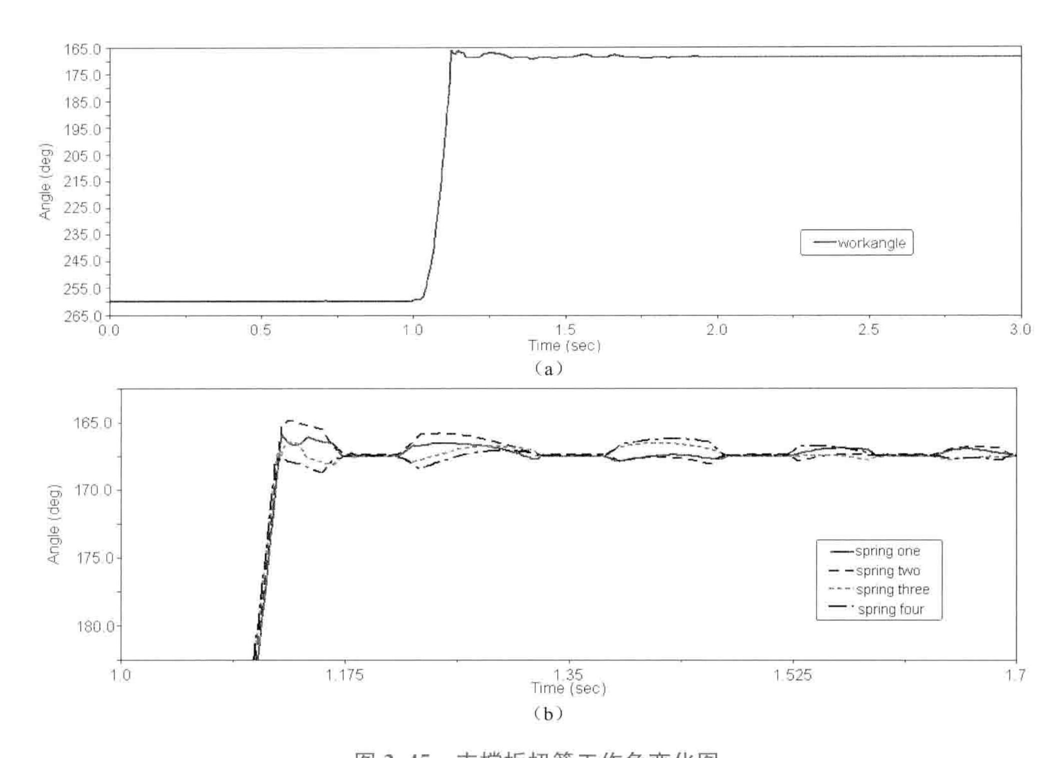


图 2.45　支撑板扭簧工作角变化图

(a) 扭簧工作角变化全局示意图；(b) 扭簧工作角变化局部放大图

支撑板扭簧在机器人着陆展开扶正前一直处于最大扭转状态，由图 2.44 可以看出，其对应的最大扭矩约为 4 300 N・mm。在着陆冲击力作用下，机器人上、中部结构下沉，支撑板挂钩得以从发射筒卡槽中释放出来，这时该最大扭矩可使支撑板在 1 s 左右时间内自动展开，于是支撑板扭簧扭转角度迅速减小，从而使扭簧扭矩也迅速降低。由图 2.44 还可看出，在支撑板展开瞬间，由于弹体此刻还在晃动，支撑板扭簧的扭矩也会产生波动，随着支撑板扶正作用的逐步发挥，扭簧扭转工作角逐渐稳定下来，其扭矩也会趋于稳定。

2.3.7　弹簧的测试实验

弹簧测试实验是检测、分析弹簧性能是否满足设计要求的有效手段。弹簧测试实验可以分为两类：一类是弹簧功能测试，一类为弹簧性能测试。弹簧功能测试是通过在机械结构中安装相关弹簧，模拟实际工作过程，检测弹簧功能是否能够实现。弹簧功能测试实验可以通过人为设定的外部参数模拟弹簧实际工作环境进行，一般较易实现。

根据智能作战机器人伞舱压缩弹簧、基座承重压缩弹簧、支撑板扭簧的功能要求和性能特性，完成符合设计要求的弹簧相关参数的拟定，并将弹簧零件图送交工厂进行弹簧加工，最后将按图纸生产出的三类弹簧在一代原理样机上进行装配。

根据智能作战机器人弹簧使用要求，对伞舱压缩弹簧、基座承重压缩弹簧及支撑板扭簧进行了机器人着陆缓冲、支撑板展开、弹体扶正等功能测试，实验数据见表 2.16。图 2.46 所示为虚拟现实实验场景，它在一定程度上反映了真实实验场景的情况。该虚拟现实场景主要为后期处理相关实验数据所用。

表 2.16 弹簧实验数据一览表

自由落体高度 /m	实验次数	着陆速度 /（m·s^{-1}）	投放倾斜角 /（°）	支撑板展开率 /%	完全展开所占次数比 /%	完全展开后扶正率 /%
0.5	10	3.2	0	65	40	40
0.5	10	3.2	10	72.5	40	40
1	10	4.5	0	95	90	100
1	10	4.5	10	85	70	100
1.5	10	5.5	0	100	100	100
1.5	10	5.5	10	100	100	90
1.5	10	5.5	20	97.5	90	78

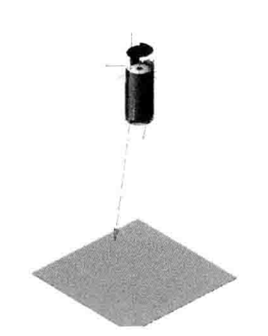
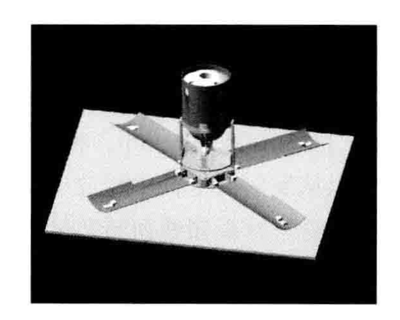



图 2.46 智能作战机器人虚拟现实实验场景示意图

通过弹簧功能实验，获得智能作战机器人弹簧参数与其功能的相关数据，具体结论如下：

① 为了使支撑板挂钩解脱发射筒卡槽的锁固作用，基座承重压缩弹簧须压缩变形 5 mm。为了保证解脱动作顺利完成，设定基座承重压缩弹簧压缩变形 8 mm。根据基座承重压缩弹簧的设计参数，当机器人实际着陆速度大于 3.75 m/s 以后，该弹簧产生的压缩变形就能保证支撑板挂钩顺利解脱。实验结果也证明了这一点。

② 当机器人以自由落体下落时，若自由落体高度为 0.5 m 时，对应的机器人着陆速度为 3.2 m/s，机器人在理论上无法完全展开，其原因在于机器人做自由落体运动的距离较短，着陆冲击力不够，基座承重压缩弹簧压缩变形量太小，支撑板挂钩不能完全

从发射筒卡槽中释放出来。

③ 当机器人着陆速度大于 4.5 m/s 时，支撑板展开率很高，说明支撑板扭簧的参数设计是正确和合理的。

④ 当机器人着陆速度达到 5.5 m/s 时，支撑板展开率基本达到 100%，说明智能作战机器人着陆展开功能在此着陆速度以上基本能顺利实现。弹体扶正功能未达到 100%，主要是由支撑板扭簧材料性能及加工水平上的不足造成的。

2.4　一代样机的改进与完善

在对智能作战机器人一代样机进行装配和实验的过程中，发现并总结了一些结构上的不足，提出了相关的改进与完善措施，具体情况如下：

① 智能作战机器人战斗部主要部件采用焊接连接方式，使机器人总体结构连接更为可靠、结构更为简单、质量更为轻盈；摄像头组件采用橡胶套包覆，利用摩擦力及结构约束方式固定摄像头组件，然后整体安装于一个配套设计的圆柱筒内，该圆柱筒与战斗部为紧密螺纹连接，可提高摄像头组件的密封性和抗震性。战斗部整体采用无螺钉连接方式，可保证战斗部机器人舱的密封性。

② 智能作战机器人中、下部结构的各零部件采用螺钉连接，以固定机器人中部的运动云台组件及相关控制部件，此时应严格检查传动组件的同轴性，保证组件连接可靠、装配方便、运转平稳。

③ 将主要传动部件如蜗轮、蜗杆、齿轮等的啮合部位采用薄膜包裹，中部运动云台外围加装防护罩，保护智能作战机器人在着陆展开后不会因为尘埃、沙土等外界环境不利因素影响机构正常运转。

④ 智能作战机器人一代样机的蜗杆与齿轮连接处的杆径过大，导致齿轮轮毂处的孔壁太薄，着陆冲击时容易导致开裂，因此将蜗杆端部杆径适当减小。

⑤ 中部运动云台座与轴承固定螺母长度过长，导致中部运动云台座上表面空间利用率低，应在下部轴承螺栓上添加垫片。

⑥ 为保证装配合理，将旋转台连接处直径与支撑杆孔径设计相同。

⑦ 伞舱盖下部弹簧导杆过短，为保证伞舱压簧不因弯曲变形而失稳，可适当增加导杆长度。

⑧ 动齿轮与其支架以及蜗轮与其支架因装配误差而容易产生较大摩擦，影响传动效率，为避免摩擦，可将支架厚度相应减少 1 mm，轴承装配尺寸不变。

⑨ 支撑板顶部挡块尺寸与卡槽尺寸相同，且挡块薄壁为方形薄板，在装配和试验时均多次影响挡块从卡槽中脱离。因此，可将卡槽宽度和高度均扩大 1 mm，并对挡块薄壁进行倒角处理。

第 3 章　智能作战机器人联合控制技术

为了完成智能作战机器人的自主作战过程，智能作战机器人的各个子系统需相互支持、协调工作，各个子系统的功能划分既要分工明确，更要相互依托，才能保证智能作战机器人预期作战使命的高效完成。按照图 3.1 所示关系，机器人各子系统的主要功能如下。

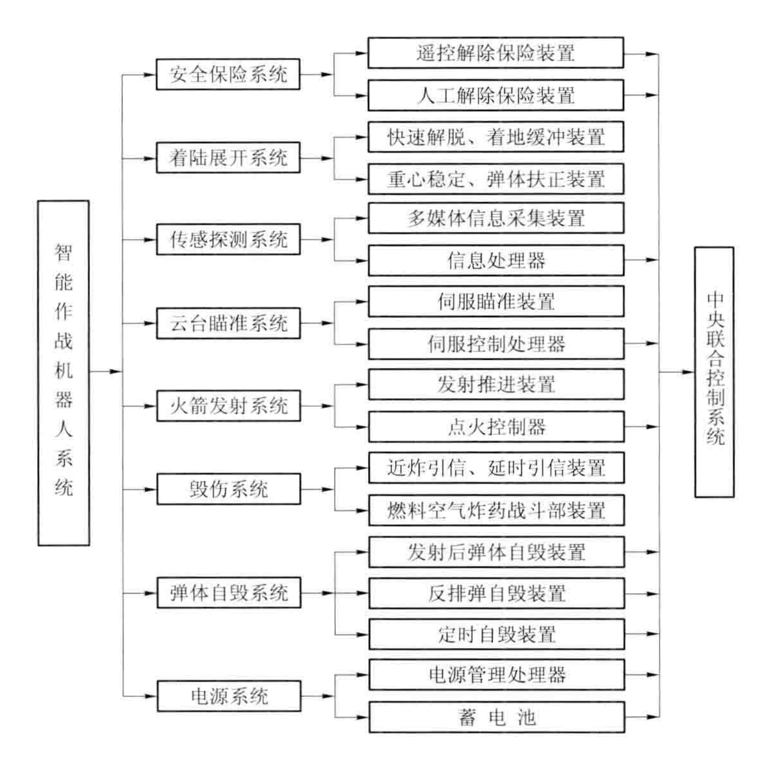


图 3.1　智能作战机器人系统构成图

1. 安全保险系统

在智能作战机器人抛撒前，保证其储存、运输和勤务处理时绝对安全可靠。

2. 着陆展开系统

在智能作战机器人着陆瞬间，利用自身重量惯性和解脱装置实现弹体展开和降落伞的快速解脱，之后由弹体扶正机构实现机器人迅速处于最佳观瞄位姿。

3. 传感探测系统

对洞库目标进行搜索、捕获、综合信息处理和识别，迅速、准确地给出目标方位和

距离信息。

4. 云台瞄准系统

在探测、捕获目标后，根据信息处理系统提供的各项目标特征参数，在满足方位误差精度和响应时间的前提下，实现战斗部的精确定位，为摧毁目标提供必要的条件。它应该满足高刚度、低惯量、小质量、高可靠性、模块化、标准化和系列化的要求。

5. 火箭发射系统

该系统是进行战斗部高效、可靠推进的装置，由点火控制器、点火模块组和助推装置等部分组成。

6. 毁伤系统

可携带 3～5 kg 高能炸药，由战斗部和引信装置组成，是摧毁敌方洞库目标的机器人起爆部分。

7. 弹体自毁系统

根据智能反工事弹的作战需求，可分为 3 种自毁模式：一是发射后弹体自毁；二是服役期满定时自毁；三是有人或车辆接近时的反排弹自毁。

8. 电源系统

该系统为智能作战机器人提供能源，由蓄电池和电源管理系统组成，通过线性变压模块为各功率元器件提供不同的工作电压，通过安全保护电路设计极大提高了供电的可靠性，实施的节能设计则有效延长了电源系统的工作时间。

9. 中央联合控制系统

该系统是智能作战机器人的核心部分，其主要功能是负责接收探测子系统的信号并进行相关运算处理、控制电动机运转以实现运动云台的扫描和定位、对电源系统进行管理以实现节能、控制火箭点火发射和控制弹体自毁模式的选择与确定等。

虽然对智能作战机器人系统总体进行了各个子系统的功能界定，但这些子系统并不是相互孤立的，而是通过中央联合控制系统这个枢纽紧密联系、相互依托的。从本质上看，智能作战机器人只有在中央联合控制系统的统筹协调和各个子系统的相互配合下才能够自主完成预期的作战使命，其协调控制关系如图 3.2 所示。

因此，中央联合控制系统作为智能作战机器人系统中承上启下的核心环节，其性能的可靠和高效与否，直接影响到整个机器人系统的综合性能。智能作战机器人研究重点放在中央联合控制系统关键技术的攻关上，统筹全局、合理规划、深入探索、反复钻研，终于取得了一些创新性的技术突破。

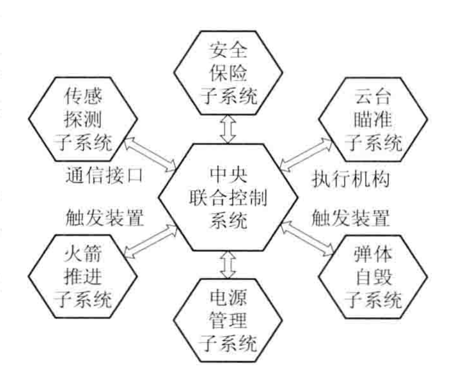


图 3.2　智能作战机器人子系统协调控制关系图

3.1 中央联合控制系统的整体方案设计

智能作战机器人主要用于攻击或封锁敌方洞库类目标，由多种运载工具或技术手段投放，其工作条件十分恶劣，所处环境复杂多变，为了保证其能顺利实现战术任务，要求其体积小、重量轻、结构紧凑、能够快速准确响应，以实现对目标的威慑和打击。根据不同的战备需求，智能作战机器人一般处于3种工作状态。

1. 探测跟踪状态

探测子系统及中央联合控制系统启动，对目标进行探测、识别及跟踪，火力系统进入待命准备阶段。

2. 休眠预警状态

当未发现目标时，机器人转入休眠状态，实现对洞库的封锁和节能电源。

3. 作战打击状态

随动发射系统驱动战斗部到指定位置，完成对目标的精确打击。

综合考虑智能作战机器人作战特点和功能需求，对其预期达到的战术性能指标做如下约定，见表3.1。

表3.1 预期达到的战术性能指标

机器人外径/mm	200	全弹长/mm	500
运动云台转动自由度	2	全弹质量/kg	15
俯仰角转动范围/(°)	0～80	弹丸长/mm	255
水平角转动范围/(°)	0～360	弹丸质量/kg	5
供电方式/V	27（DC）	昼夜有效探测距离/m	200
各方位最大转动误差/(°)	1.2	目标正确识别率/%	90
各方位最大调整时间/s	5	助推射程/m	200
弹体材料	铝合金	目标命中准确率/%	80
使用温度/℃	−10～+50	打击区域/m^2	30 000

在智能作战机器人中央联合控制系统总体方案的设计上，根据图3.3所示思路，按照系统软硬件设计再到仿真与样机试验的设计流程逐步展开。首先，在硬件设计时，采用了基于DSP控制器的微处理系统，在相关器件选型完成后，进行了硬件平台的搭建和整体调试，使其尽可能完美地满足使用需求；其次，在软件设计时，对软件功能进行了恰当的划分，确定了具体的软件设计算法和实现途径；最后，通过仿真实验与样机调试，对中央联合控制系统的性能进行了综合测试，同时对系统还进行了合理修正与优化。

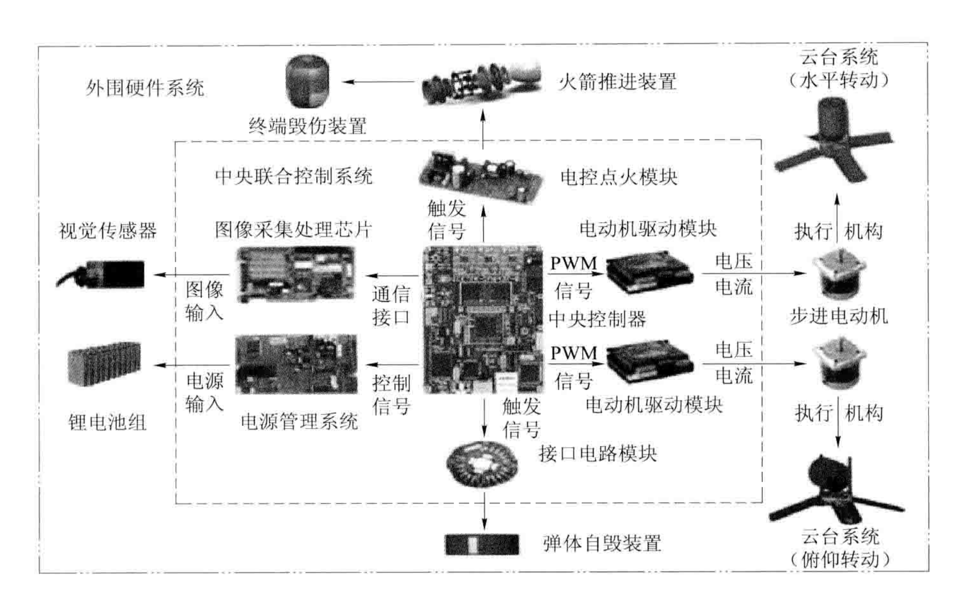


图 3.3　中央联合控制系统总体方案示意图

由于智能作战机器人中央联合控制系统在各子系统之间起着桥梁纽带作用，因此，在设计该控制系统时，应把主要精力放在其自身上，对于其他相关子系统，只需兼顾其与控制系统的电气接口即可，这样也体现了模块化的设计思想。需要指出的是，采用模块化思想设计中央联合控制系统时，各个子系统独立设计，系统内部的模块各司其职，独立完成各自的功能，而在系统外部留出相应接口，所有子系统间的相关作用和联系都通过这些接口来完成。按照上述处理方式，各个子系统的设计都可以独立完成，而对于需要发生关系的子系统，可以相互约定接口的具体形式和工作流程。这种设计方法能够简化设计流程，缩短研制时间，降低设计成本，节省研究精力。

按照图 3.3 所示的中央联合控制系统总体方案，在进行控制系统硬件设计时，主要精力放到了具有特定功能和核心作用的控制器设计上。在设计控制器时，除了要保证控制器正常工作外，还需要根据它和其他子系统的相互关系，设计出合理的控制接口，并完成系统间的机电接口连接。按照这样的设计思路，中央联合控制系统硬件设计的主要任务应落实到各控制器和其接口电路的设计上。在明确控制系统的设计任务和研制工作的重点后，硬件设计的任务就可以独立而有效地开展。

通过研究，克服在组建智能作战机器人中央联合控制系统中遇到的各种技术难题。当中央联合控制系统硬件部分的基本电路和接口设计完成并调试成功后，随即进行中央联合控制系统软件部分的设计。从本质上看，软件系统的功能主要是一些特定信号和时序信号的适时实现，如通信信号、电动机控制信号、适时触发信号等。这些信号依赖控制器的硬件部分来具体实施，但却是控制器的 CPU 通过执行相应的软件代码来操作实现的。通过编写不同的代码，可以使控制器实施不同的控制功能和控制策略，在不改变

硬件系统的前提下获得实际控制功能的改进和扩展，这也是智能作战机器人中央联合控制系统具有可编程功能的具体体现。

在完成智能作战机器人中央联合控制系统软硬件设计之后，通过仿真实验与样机调试，分析控制系统在处置不同任务时的工作性能，得知该控制系统因采用先进的设计理念和工作模式，在面临不同使用环境、不同工作方式、不同控制任务时都能够有效完成既定的作战使命，圆满实现预期的高质量、高速度、低成本、低功耗的设计目标，具有十分先进的设计水准和技术水平。

3.2 中央联合控制系统的硬件设计

智能作战机器人是一个完全智能控制的武器系统，投入使用后，其运行无须人为干预，因此，系统运行的稳定性、可靠性和快速响应性很大程度上取决于硬件系统设计的优劣。根据智能作战机器人的工作原理和功能特性，对基于整体构架的系统硬件设计进行了长达数年的系统研究和科学探索，着重研究了主控芯片的选型与设计、运动云台硬件的选型与设计、电控点火与电源管理系统的硬件设计和双 DSP 通信系统的连接与实现等。

当智能作战机器人着陆扶正后，要求其能够自主实现自动扫描、自动拼图、自动处理、自行瞄准、自主发射或自毁保护等功能，并可根据图像及音频传感器采集到的数据自主对目标进行识别和判断，属于典型的传感探测和运动控制相互协调、并行工作的系统。因此，在其控制系统搭建时，通过广泛调研、多方比对、合理借鉴、科学移植，决定采用 DSP C6000+C2000 的双核架构。由于 C6000 具有较高的工作主频，运算功能强大，但其控制端口较少，控制能力一般，而 C2000 芯片是专门为电源、电动机等工业控制而设计的，具有强大的数据处理能力和综合控制能力，因而可将 C6000 芯片主要用来对采集的现场图像、音频信息进行分析和处理，完成目标识别和判断，并输出处理结果；C2000 芯片则主要用来接收 C6000 芯片的处理结果，并完成相应的任务管理，如运动云台的扫描、搜索运动、点火发射的实现，等等。与采用单一核心控制芯片相比，采用 DSP C6000+C2000 的组合架构既能解决 C6000 控制能力稍显不足的问题，又能克服 C2000 多媒体处理功能薄弱的缺点，从而在智能作战机器人传感探测和联合控制之间找到一个很好的结合点和平衡点，起到了功能互补、效能互促的良好作用，最大限度地满足了智能作战机器人中央联合控制系统在综合使用性能上的需求。

根据智能作战机器人的功能需求和控制特点，其控制系统可由图 3.4 所示外围多媒体信息采集系统、核心控制系统、专用终端系统三大部分组成，其中，外围多媒体信息采集系统与多媒体处理芯片连接，负责采集并传送外接图像和音频信息，以供识别与处理。核心控制系统以 DSP C2000 为核心部件，按分布式控制方式即上、下位机两级微处理器结构进行布置，下位机采用 DSP C2000 处理器芯片，用于接收上位机指令并实现专用终端系统各功能的运动控制，上位机采用 DSP C6000 处理器芯片，主要完成多

媒体信号的模数转换、格式转换、信息识别、处理运算及与下位机的信息交互等任务。专用终端系统根据核心控制系统下达的控制命令完成各子系统中特定的工作任务。

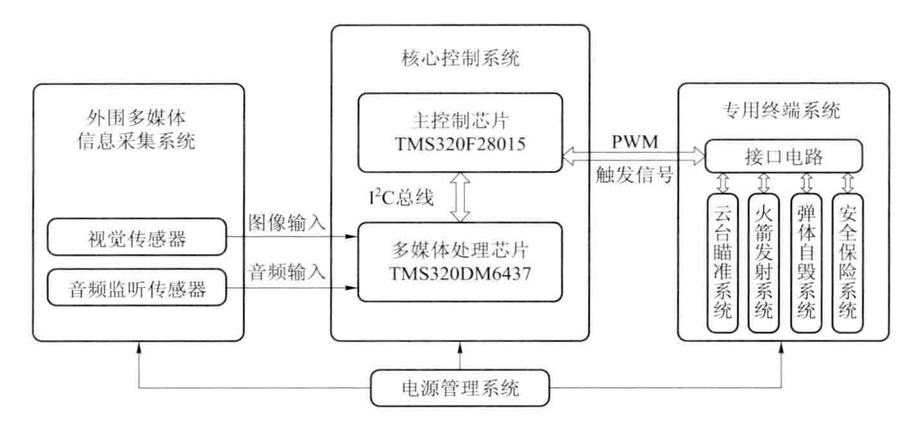


图 3.4　智能作战机器人控制系统总体结构图

3.3　中央联合控制系统主控制器的硬件设计

1. 主控芯片的选型

主控芯片是中央联合控制系统的重要组成部分，考虑到需与已选定的多媒体处理芯片协调工作，选用了与 DM6437 同出一门的 TMS320F28015（以后简称 F28015），该芯片不但与 DM6437 有相同的电平定义及加工工艺，而且在许多小模块上也功能一致，从而便于两者的协调与集成。F28015 芯片将各种高级数字控制功能集成在一个 IC 上，强大的数据处理和运动控制能力能够在提高应用效率的同时降低功耗，其片内还整合了 Flash 内存、RAM 内存、A/D 转换器、增强的 CAP 模块、ePWM 单元、正交编码电路接口等外设，从而大大简化了 DSP 系统外围电路的设计。同时，其 CPU 内核的工作频率可达 60 MHz，CPU 片内拥有 1 个 32 位乘法器和 1 个实时 JTAG 接口，7 个 32 b 定时器，通过内存总线的连接，CPU 可以与片内的 12 KB RAM、32 KB Flash、4 KB Boot ROM 快速完成数据读写。另外，F28015 还通过外围设备总线，扩展了丰富的外围接口，这些接口主要包括：8 路 PWM（其中 4 路为 HRPWM（High Resolution Pulse Width Modulation，高精度脉冲宽度调制），主要用于高频 PWM 信号发生）、1 路 SPI（Serial Peripheral Interface，串行外设接口）、1 路 SCI（Serial Communication Interface，串行通信接口）、1 路 I^2C（Inter-Integrated Circuit，内部整合电路接口）、16 路 12 b ADC、2 路 CAP（Capture Unit，捕捉单元）、35 路 GPIO（General-Purpose I/O ports，通用 I/O 口）。F28015 功耗极低，性价比较高，LQFP 封装尺寸大小不超过 12 mm×12 mm，这使得其非常适用于对成本、功耗及体积有严格要求的嵌入式控制场合。F28015 芯片的功能原理框图如图 3.5 所示。

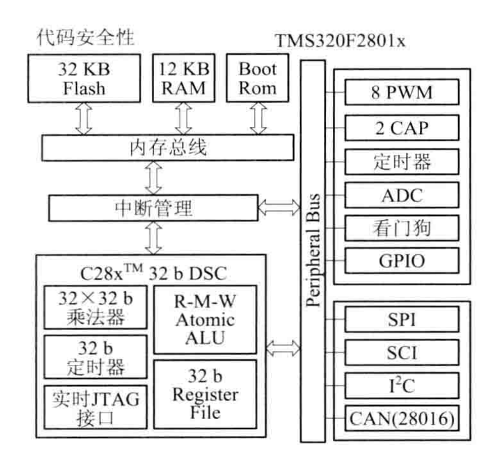


图 3.5 F28015 芯片的功能原理框图

在智能作战机器人控制系统中，主控芯片 F28015 主要完成与图像处理芯片 DM6437 的数据通信、运动云台系统两路步进电动机的精确定位控制、适时触发时序控制信号等多重任务。

2. 主控芯片基本系统设计

（1）F28015 引脚连接电路设计

F28015 有 100 个管脚，采用 LQFP 扁平正四边形封装，每边各引出 25 个引脚，管脚按功能主要分为以下几部分：GPIO 引脚、I²C 引脚、SCI 引脚、SPI 引脚、ADC 引脚，PWM 引脚、CAP 引脚、JTAG 测试管脚和重启/时钟/电源/地管脚，具体连接如图 3.6 所示。

图 3.6 F28015 的管脚连接图

（2）电源电路的设计

对于器件较多的硬件系统，由于各器件供电电压不一致，导致系统往往需要提供多种电源。对于由 F28015 构成的硬件系统来说，主要的供电电压包括＋3.3 V（V_{CC}_3V3）和＋1.8 V（V_{CC}_1V8），整个系统采用外接＋5 V 直流电源供电，所需的不同电压通过两片 TPS54310 芯片来实现电平转变。

F28015 对于片内的各个部件采用了独立的电源供给方式：

① 内核采用 1.8 V 供电；

② Flash 和 RAM 存储单元采用 3.3 V 供电；

③ I/O 口采用 3.3 V 供电；

④ A/D 模块既有采用 3.3 V 供电的，也有采用 1.8 V 供电的。

F28015 电源系统中 5 V 转 3.3 V 及 5 V 转 1.8 V 的电路图分别如图 3.7 和图 3.8 所示。

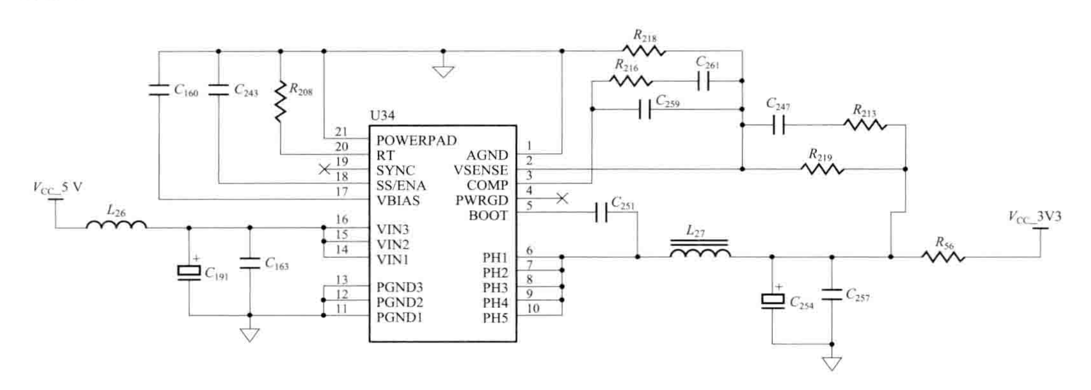


图 3.7　电压 5 V 转 3.3 V 的电源电路图

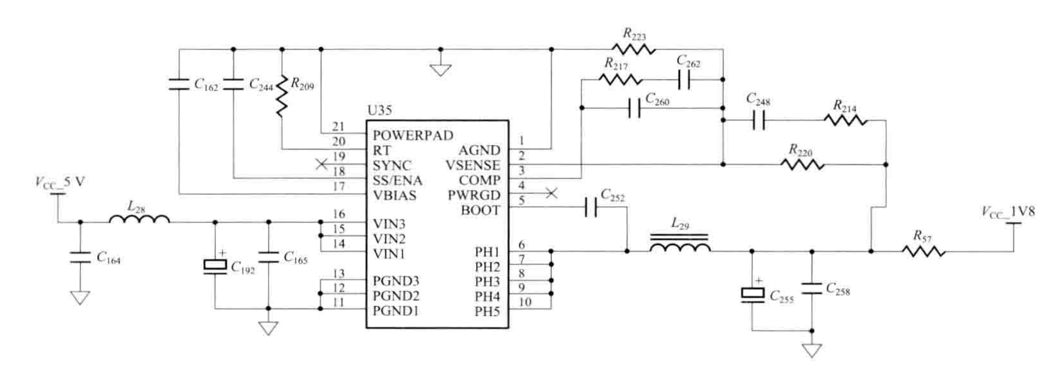


图 3.8　电压 5 V 转 1.8 V 的电源电路图

（3）时钟晶振电路设计

F28015 的 F28x＋ CPU 核心工作需要外部时钟信号的输入。在本系统中选用了工

作频率为 20 MHz 的无源晶振，经过 F28015 的片内 PLL 锁相环电路进行倍频，能够使 F28015 处理器的工作频率达到 60 MHz。为了防止电磁干扰且精确有效地产生时钟信号，在无源晶振两端接地时，一般需要串联两个容量大小为 24 pF 的电容。晶振电路的连接情况如图 3.9 所示。

（4）主控芯片外部接口电路设计

前面所述为以 F28015 为核心的基本最小系统的设计。设计出最小系统后，主控芯片就可以正常启动工作了。但要想主控芯片能够高效、顺利地完成系统任务，还需与外界系统建立起良好的接口连接。对于一个实际应用的硬件系统来说，其外部接口的设计非常关键。接口的设计往往需要根据系统所需功能来进行。由图 3.10 可知，F28015 控制芯片的片上资源非常丰富，这使得其功能实现和功能扩展变得十分简单和方便。正是由于这些外部接口的存在，才使得 F28015 能够充分发挥其性能，高效、可靠地完成各项预期任务。

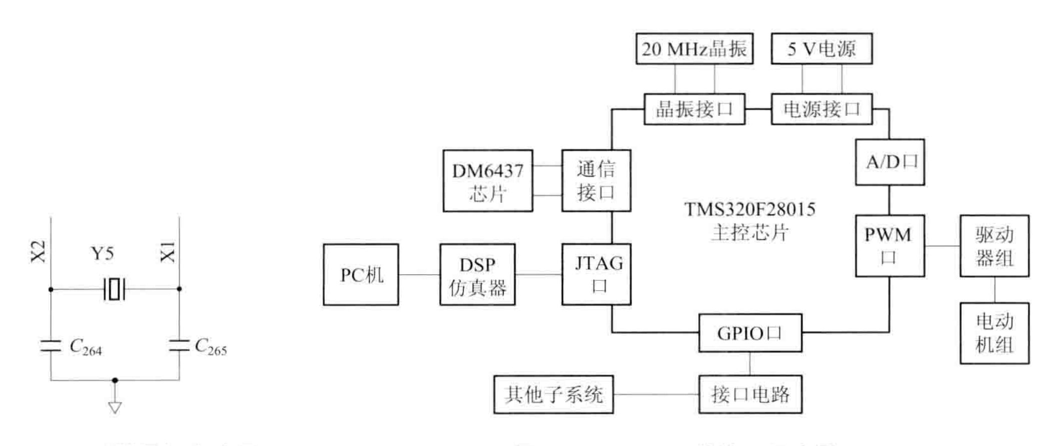


图 3.9　时钟晶振电路图　　　　**图 3.10　F28015 的接口示意图**

（5）PCB 及其接口设计

由于智能作战机器人的中央联合控制系统需在复杂环境下完成多媒体信息的采集与处理、运动控制及信息交互等工作，而且其电路板需安装在空间狭窄、尺寸受限的战斗部筒体下部，因此，设计 PCB（Printed Circuit Board，印刷电路板）时，对其尺寸和体积有严格的要求。

在实际电路的设计中，为了减小板卡的尺寸，同时为了提高系统的可靠性、稳定性、牢固性和抗干扰性，采用集成芯片而非分离器件来搭建系统，即将 F28015 和 DM6437 设计在同一块 PCB 上。这样一来，不仅控制子系统的接口，而且探测子系统的接口也设计在同一块板上，因此，PCB 接口类型比较丰富，除了电源口、视频信号输入接口、I/O 口等必备接口外，为了方便初期调试，还加入了串口、视频信号输出口等接口，尤其是为了提高控制系统的可扩展性，还特地引出了 F28015 的所有可用 I/O

口，这对后期增加功能和升级系统将非常有用。另外，对于双 DSP 的通信问题，采用了适于短距离高效通信、接口连接简单可靠的片内 I^2C 总线接口。研制的双 DSP 控制系统 PCB 外观及接口如图 3.11 所示。由图可知，核心芯片均采用 LQFP 的小尺寸高集成度封装形式，通过合理布置器件和采用多层板走线技术，以及双 DSP 系统共用相同功能元器件，最终的板体尺寸为 90 mm×100 mm×12 mm，能够方便、稳妥地装入安装战斗部筒体下部，且其固定形式十分合理，调整工作十分方便，采用这种板卡结构，不仅大大减小了控制板卡的尺寸，而且降低了电磁干扰，提高了整个系统的可靠性，很好地满足了系统硬件设计的要求。

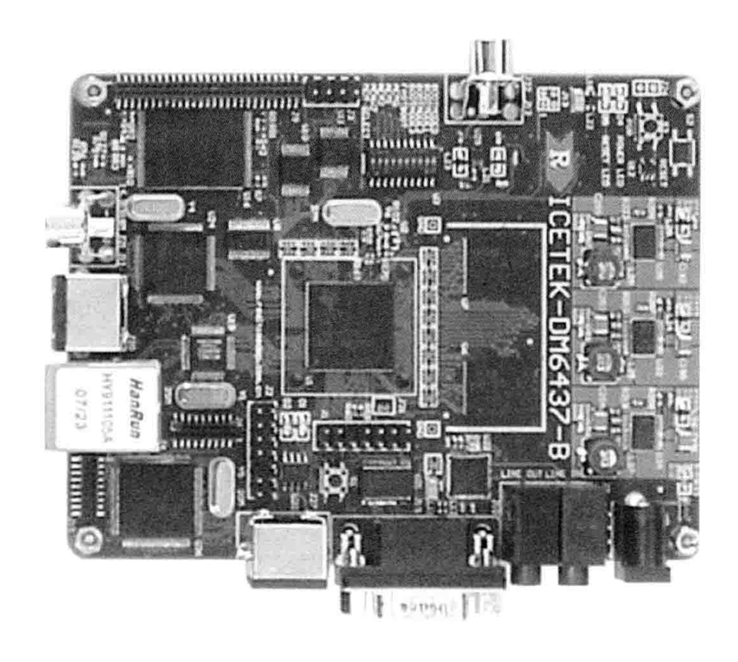


图 3.11　双 DSP 系统 PCB 板外观及接口图

3.4　运动云台系统的硬件设计

运动云台的控制是智能作战机器人中央联合控制系统要实现的主要任务之一，其控制效果直接决定了目标识别、定位、攻击的灵活性、精确性和快速性。因此，运动云台系统的控制方案的设计是极为重要的，也为此付出了很多精力与时间。

1. 运动云台系统的硬件及接口设计

根据运动云台系统的设计方案和主控芯片的选型结果，运动云台控制系统采用 TI 公司生产的 TMS320C2000 系列 DSP 控制芯片 TMS320F28015 和两个电动机驱动器来实现对两路步进电动机的联合控制，其中包括 F28015 辅助电路、驱动电路、信号输

入/输出电路、通信电路及电源管理电路，系统的硬件连接如图 3.12 所示。DSP F28015 拥有 35 路 GPIO，其中 8 路可复用为 EPWM 口，在此需要 6 路 EPWM 口来分别与两个驱动器的脉冲信号输入端、方向信号输入端、释放信号输入端相连。另外，由于驱动器采用共阳极工作方式，其公共端需要接高电平，还需将 F28015 的 V_{CC}_3V3 引脚连接到两个驱动器的公共端。因此，仅需占用 7 路 GPIO 即可实现对运动云台俯仰运动驱动电动机和水平运动驱动电动机的实时控制。与上位机通信则采用接口简单、功能可靠的片内 I^2C 串行总线，实现上下位机数据的高效、可靠传输。电动机驱动器所用 YKA2204MA 是一款专用于步进电动机驱动的等角度恒力矩细分型高性能组件，具有双极恒流驱动、体积小、运行平稳、发热低、噪声低、性价比高的特点。其 A+、A−、B+、B−端分别与步进电动机的红绿蓝黄线相连，并采用 27 V 直流电源供电。F28015 采用+5 V 供电，电动机驱动器 2HB3525 采用+27 V 供电，因此，电源管理电路需提供以上两种电压。智能作战机器人自带 7 节串联式锂电池，输出+27 V 直流电，可直接为 2HB3525 供电，+27 V 直流电通过 GAIA 军用电源模块 MGDM−04 降压到+5 V，再对 F28015 供电。

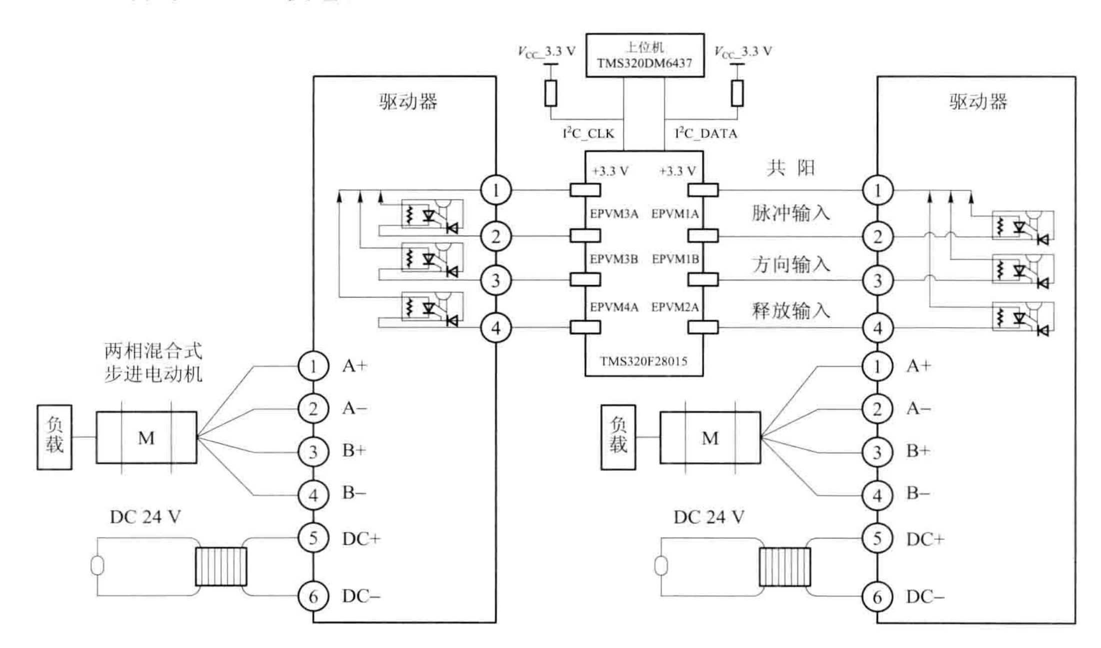


图 3.12 运动云台控制系统硬件结构框图

2. 运动云台执行装置的选型与设计

(1) 执行装置的特性对比

执行装置是任何机电系统的重要组成部分，在一定程度上决定了机电系统的带载性能和动力性能。从控制的角度来看，执行装置主要有以下三个作用：一是高效率地给负载提供动力；二是正确控制动力产生装置提供的力或运动；三是快速实现对动力产生装

置的控制。从工作原理上来划分，提供驱动力矩的执行元件一般包括电动机、气动马达和液压马达三大类。

智能作战机器人在俯仰角方向和水平角方向上的运动是通过执行元件的驱动来实现的，因此，执行元件在智能作战机器人运动云台系统中有着非常重要的地位。正确选择合适的执行元件是运动云台系统顺利实现其功能的重要保证。从智能作战机器人的工作环境、工作流程和工作原理来看，选择电动机作为其执行元件是比较理想的。

目前使用比较广泛的几种电动机是：交流电动机、有刷直流电动机、无刷直流电动机、步进电动机和舵机，其特点见表 3.2。

表 3.2　电动机的类型与特点

电动机类型	优　点	缺　点
交流电动机	转子惯量小，动态响应好，结构简单，运行可靠，效率较高	体积大，启动特性欠佳，低速性能较差
有刷直流电动机	机械特性非常优秀，调速范围宽，启动转矩大，控制电路简单	结构复杂，可靠性差，存在火花、噪声等问题
无刷直流电动机	保留了直流电动机的优点，而且结构简单，运行可靠，维护方便	尺寸较有刷直流电动机的大，控制较为复杂，在要求功率大、体积小、结构简单的场合无法取代有刷直流电动机
步进电动机	数字控制，无累计误差，简单，廉价，可靠，动态响应快，易于启停、正反转和变速，调速范围宽，低速转矩大	只能通过脉冲电源供电才能运行，容易出现震荡和失步的现象，自身的噪声和振动较大
舵机	以直流电动机为中心的位置伺服系统，体积小，转矩大	转动范围一般不超过 180°，主要面向航模，精度、转矩有限，动态响应较慢，对脉冲宽度要求较为苛刻

从表 3.2 中可以看出，步进电动机是纯粹的数字控制电动机，是一种将电脉冲转化为角位移的执行机构。它将电脉冲信号转换为角位移，当步进驱动器接收到一个脉冲信号，它就驱动步进电动机按设定的方向转过一个固定的角度，于是可以通过控制脉冲个数来控制角位移量，从而达到准确定位的目的；同时，也可以通过控制脉冲频率来控制电动机转动的速度和加速度，从而达到调速的目的。由于步进电动机控制方式简单，因此非常适合于做点位控制。一般说来，步进电动机具有如下几个特点：

① 可以用数字信号直接进行开环控制，整个系统简单廉价。

② 位移与输入脉冲信号数相对应，步距误差不长期积累，可以组成结构较为简单而具有一定精度的开环控制系统，也可以在要求更高精度时组成闭环控制系统。

③ 无刷，电动机本体部件小，可靠性高。

④ 易于启动、停止，正反转及变速响应性好。

⑤ 停止时，可有自锁功能。

⑥ 步距角选择范围大，可在几十分至180°大范围内选择。在小步距情况下，可以在超低速下高转矩运行，通常可以不经减速器直接驱动负载。

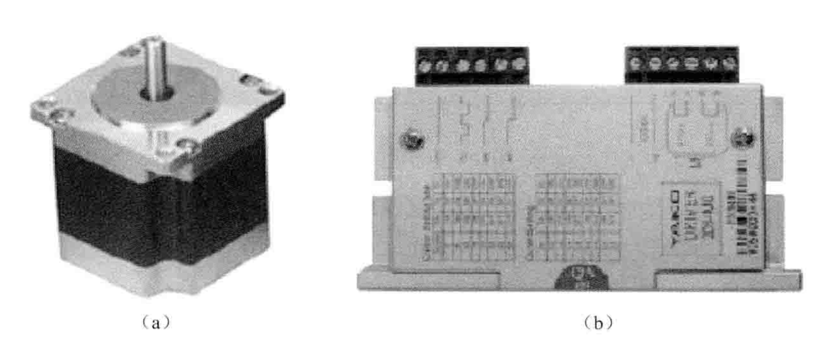
对于智能作战机器人运动云台系统来说，由于它有体积和重量的限制，对于执行元件来说，质量越小，体积越小越好，还要保证其具有很好的定位精度，易于控制，并只能由直流电源驱动，步进电动机能较好地满足这些要求。此外，步进电动机具有很好的自锁功能，可十分方便地实现平稳启停和转向，以及转速的快速调整，有利于智能作战机器人探测子系统稳定、高效地工作。

综上所述，智能作战机器人运动云台系统中执行装置确定为步进电动机。

（2）执行装置的选型

步进电动机的选型应视具体应用情况而定：负载的性质（如是水平负载还是垂直负载等）、转矩、惯量、转速、精度、加减速等要求；控制对端口和通信方式的要求；控制方式的选择；供电电源电压范围；电动机的体积，等等。以上这些情况都会对步进电动机的选型产生一定的影响。另外，根据智能作战机器人的作战需求，还可对系统的机械结构进行数学建模和Adams与Matlab软件联合仿真，从而得到电动机角速度曲线和转矩曲线，用以确定电动机转矩、转速等参数的范围，进而结合其他参数确定电动机及驱动器的型号。

综合各项指标要求，本着经济适用、方便调试的原则，选择了和利时电动机公司的42系列两相混合式步进电动机（图3.13），具体型号为42BYG250C—S，其矩频特性曲线如图3.14所示。



（a）　　　　　　（b）

图3.13　和利时公司42系列两相混合式步进电动机和YKA2204MA步进电动机驱动器

（a）两相混合式步进电动机驱动器；（b）YKA2204MA步进电动机驱动器

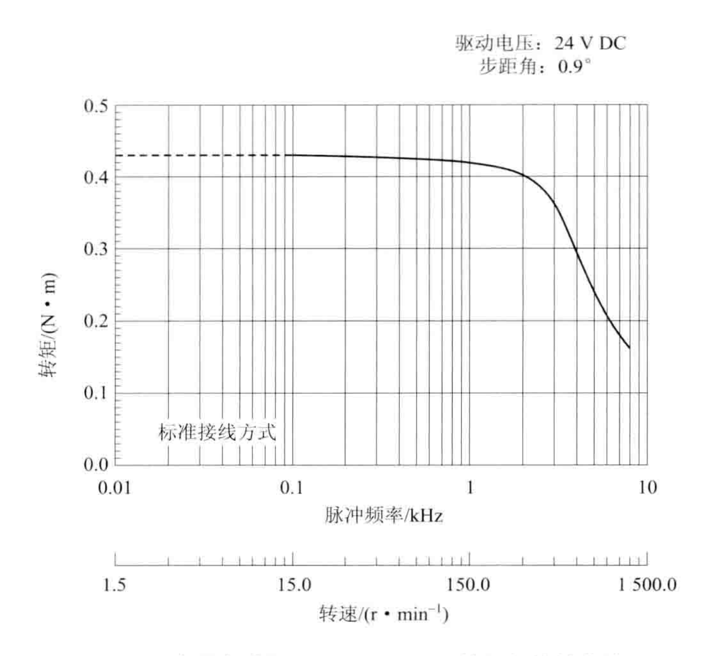


图 3.14　步进电动机 42BYG250C—S 的矩频特性曲线图

由图 3.14 所示电动机矩频特性曲线可知，当电动机驱动脉冲频率不大于 6 kHz 时，电动机的输出转矩都大于 0.192 N·m，可以很好地驱动负载工作。步进电动机 42BYG250C—S 的相关技术参数可见表 3.3。

表 3.3　步进电动机 42BYG250C—S 技术参数表

电动机型号	相数	步矩角 /(°)	相电流 /A	保持转矩 /(N·m)	相电感 /mH	质量 /kg	转动惯量 /(g·cm^2)
42BYG250C—S	2	0.9/1.8	1.5	0.45	3.85	0.36	82

另外，与步进电动机 42BYG250C—S 配套使用的电动机驱动器选用中创天勤公司生产的 YKA2204MA，这是一款高性能、低噪声、体积小、功耗低的两相步进电动机驱动器，采用双极恒流斩波方式，光电隔离信号输入/输出，具有过流、过热、短路和错相保护，设有 10 挡等角度恒力矩细分，最大相电流可达 2 A，支持 64 细分，可以平稳高效地驱动步进电动机，充分发挥其运行性能。电动机与驱动器的性能均满足实际使用需求，同时也可满足控制精度的要求。

3.5 电控点火系统的硬件设计

1. 电控点火系统的组成

智能作战机器人电控点火系统主要由控制模块、模拟开关电路、点火驱动模块和点火模块组成（图 3.15），主控芯片 F28015 控制该系统以实现其快速、实时、安全和准确地点火。当运动云台系统对准目标后，主控芯片发出相应触发信号，中断调用点火控制子程序，首先打开点火电路静电保护开关，然后控制点火电源给电容器充电，使起爆器装置半导体桥（SCB）处于待发状态，紧接着发出点火信号，经过开关电路和点火驱动电路发出点火脉冲，点火电路中的可控硅闭合，点火电路接通，电容器瞬间放电产生的高电流使 SCB 发火，从而启动火箭助推装置，对目标实施打击。

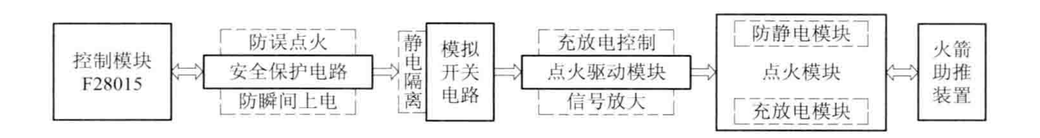


图 3.15 智能作战机器人电控点火系统组成框图

在图 3.15 所示电控点火系统的组成模块中，控制模块主要由主控芯片 F28015 及其外围接口构成。F28015 除了发出点火信号外，在此之前，还要给出点火电源充电和打开静电保护信号。点火控制子程序在接到点火命令后即被中断调用，通过 I/O 通信端口给电源发出充电指令，通过模拟开关的信号传递将点火电容器与 27 V 电源连通，进行充电。充电完成即发出断开信号。经过一定的延时，F28015 发出点火信号，经过开关芯片转换电平，给由单稳态触发器构成的驱动电路触发信号，使其由稳态进入一定时间段的暂稳态，该暂稳态高电平驱动可控硅将点火电路接通。点火电路一旦接通，电容器就立即放电，产生很大的脉冲电流，点燃 SCB。

对于图 3.15 中的模拟开关电路来说，由于 F28015 只能通过外设接口发出高低电平来对电路进行控制，所以需要接入一个模拟电子开关，将 DSP 和点火电路连通起来。F28015 保持低电平时，认为没有发出信号，该开关芯片的输出也应该是低电平。一旦 DSP 发出信号，该芯片就应该视为开关闭合，输出应该等于输入信号。该开关芯片主要用于输出点火电源的连通信号与流向单稳态触发器的点火触发信号。由于 F28015 的 I/O 端口给出的高电平为 3.3 V 的 TTL 电平，必须通过该电路将其转化成 5 V 的 CMOS 电平。

图 3.15 中的点火驱动模块的任务是接收 DSP 发出的点火触发信号，将其转换为可以接通点火电路，并给予其足够的时间来完成电容器放电点火的触发脉冲。该电路主要

由一个单稳态触发器构成。没有信号时，输出一直为低电平的稳态，一旦接收到触发信号，立即进入一定脉宽的暂稳态，最后又回到稳态。而且此暂稳态脉宽一旦触发，就与输入信号无关，完全由其自身的 RC 决定。由此可见，可触发脉冲的脉宽是电容器能否完成放电和能否点燃 SCB 以完成发火命令的关键，因此，要通过调节其连接的 RC 来控制暂稳态的脉宽，使其提供足够的时间给电容完成放电过程。

图 3.15 中的点火模块的主要功能是通过防静电常闭开关实现对静电的有效泄放。另外，该模块的点火装置采用具有发火能量低、发火时间短、一致性好、延迟短等优异性能的 SCB 火工品，通过电容的充放电，将大电流作用在 SCB 上，点燃点火药达到点火目的。之所以采用 SCB，是因为它具有如下优异性能：

① SCB 的体积约为桥丝的 1/30，所需发火能至多为其 1/10。

② SCB 具有负阻效应，作用时以等离子体引燃药剂，作用时间比桥丝快 1～2 个数量级，而且同步性好。

③ 不发火性能优良，其不发火能量等于全发火能量的 80%。

④ 其防射频、抗静电和杂电流的性能好。

⑤ 采用现代微电子设计与制造工艺，可与复杂的数字电路组合，使其具有延期、逻辑控制等功能，可自动化大批量生产，一致性好，性价比高。

2. 电控点火电路的设计

根据电控点火系统的模块组成，设计的电控点火电路如图 3.16 所示。该电路以模拟开关芯片为界将整个电路分为左右两个部分，左边为控制电路，用于产生触发脉冲控制信号；右边为电路的充放电控制回路，通过电容的放电来达到点燃 SCB 的目的。

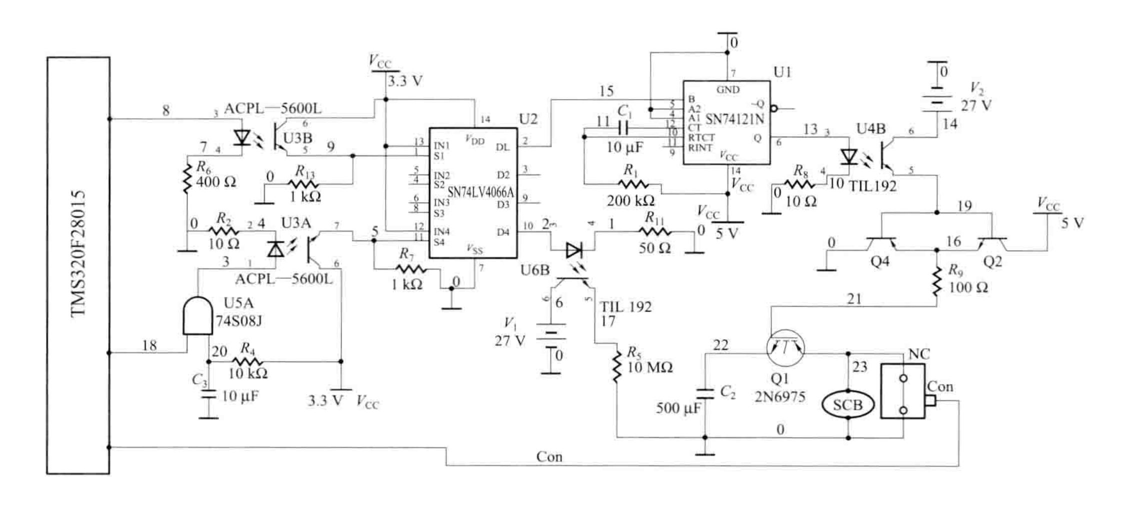


图 3.16　电控点火电路原理图

在图 3.16 中，SN74121N 是集成单稳态触发器，它在外界触发信号作用下能产生一定宽度输出脉冲，具有使用简便、输出脉冲调节范围宽等优点，在使用时通常只需外接一个电阻和一个电容即可。通过改变电阻、电容的大小，可以获得数十纳秒至数秒宽的延长持续时间，而且延长的时间等于每次单独触发时暂稳态的持续时间。SN74LV4066A 为 3.3 V 模拟开关芯片，主要用来将 DSP 发出的控制信号转化为电信号，工作电压 V_{CC} 为 2～5.5 V 的四通道 CMOS 模拟开关，该开关能处理模拟和数字信号，每一个开关的许可信号幅值为任一方向上的 5.5 V；与开关芯片相连的前两个光电耦合器选用了 Avago 公司生产的 ACPL－5600L 型 3.3 V 光电耦合器；与点火电源控制电路和点火电路相连的两个光电耦合器选用了 TI 公司生产的 TIL192 型光耦；IGBT 是绝缘栅双极型晶体管，它是由 BJT（双极型三极管）和 MOS（绝缘栅型场效应管）组成的复合全控型电压驱动式功率半导体器件，兼有 MOSFET 的高输入阻抗和 GTR 的低导通压降两方面的优点，其作用是通过加正向栅极电压形成沟道，给 PNP 晶体管提供基极电流，使 IGBT 导通，反之，加反向门极电压消除沟道，切断基极电流，使 IGBT 关断。本电路选择西门子公司生产的 SGW25N120 型号的 IGBT 作为点火控制开关。

3. 电控点火电路的安全性设计

由于智能作战机器人在生产过程中和交付使用后，各种火工品都已装在弹内，成为潜在危险物。为了避免在储存、运输、保养等环节中出现意外事故，其点火电路的可靠性、安全性和电磁兼容性等应给予极大重视。为了防止由于瞬间上电、静电以及 DSP 硬件初始化阶段可能导致的点火电路误动作，采取在电路中加装独立回路设计、延时输出保护、冗余控制等措施，这样就可以有效地增强点火电路的可靠性和安全性。

（1）系统的瞬间上电干扰与对策

通过多次实验发现，DSP 在系统上电后不能马上进入正常工作状态，而需要一定的延迟时间，在延迟时间内，单片机各输出管脚的状态是不确定的，这样由单片机输出的点火信号也不在可靠的零电位上而会有干扰脉冲出现，如果此时点火电源电压足够高，并且干扰脉冲时间足够长，就有可能输出足够能量的点火电流而产生误点火。为了防止这种现象的发生，通过反复试验，决定采用点火控制电源延时供电的方法，即将点火电源控制信号端与一个与门连接，该与门的另一端接入的是一个 RC 充电回路，充电电源是系统给出的 5 V 电源（即 F28015 的电源）。这样当系统上电时，与门接 RC 电路的一端就开始给电容 C 充电，充电的时间为 $3RC$，通过设定 R、C 的值，使得充电时间大于上电的不稳定时间 40 ms。这样即使 DSP 上电时给出了不稳定的电源控制信号，与该信号相连的与门，由于相接的另一端还在充电，输出为低电平，所以此时与门并不会输出高电平，这样就避免了错误点火电源控制信号的误点火。RC 充电完成后，与门打开，其输出完全由点火电源控制信号来决定，对

电路功能不会产生不利影响。

（2）静电干扰与对策

静电放电（ESD）是一个涉及高电位、强电场及瞬时脉冲大电流的过程，放电时还会产生强烈的电磁辐射。静电放电产生的电流可达数十到上百安培。当如此大的电流注入电火工品、电子装置或静电敏感器件时，就会使电火工品误爆，从而造成事故。由于危险静电源普遍存在，电火工品及其产品在生产、运输、存储和使用的过程中，不时有意外点火的静电危害事故发生。为了防止静电放电引起电火工品及其产品的意外爆炸，必须根据静电放电的特点及 ESD 模型和火工品发生静电危害事故的内在原因，有针对性地采取防护措施。在本设计中，一方面，采用了隔离防静电的策略，即让点火驱动电路的点火电源和点火地与整个系统地和系统工作电源形成互相隔离的回路，从而使静电无法通过系统地作用到点火地上，进而作用到点火具的引脚上，避免了静电火花引起的危害；另一方面，在 SCB 的静电泄放上采用了 ISL4311X 高性能常闭模拟开关进行短路连接，实现泄放电阻对产生的静电进行消耗。

（3）防止误点火的安全性设计

点火电路的误点火是指 SCB 不应点火时而意外发火，这是非常危险的，轻则暴露自己，重则造成安全事故，需绝对避免。误点火主要来源于干扰信号，如 DSP 芯片管脚不稳定，就可能产生干扰电平，DSP 在控制其他系统时也会产生干扰信号。为了防止误点火的发生，电路必须具有很强的抗干扰能力。由于光电耦合器是将光发射器和光敏器的芯片封装在同一壳体内，并用透明树脂灌封当作光传递介质，通常将光发射器的管脚做输入端，光敏器的引脚作为输出端，当输入端加电信号时，光发射器发出的光信号通过透明树脂光导介质投射到光敏器后，转换成电信号输出，实现了以光为媒介的电→光→电信号的转换传输，在电气上是完全隔离的，可在不同电位和不同阻抗之间传输电信号，对信号具有放大和整形等功能，且光信号不受电磁干扰，工作稳定可靠。因此，本设计采用在 DSP 芯片下加装光电耦合器来增强抗干扰能力，所选用的 TIL192 型光耦最低导通电压为 3 V，从而可以对低于 3 V 的干扰信号起到有效的截止和滤波作用。由于光信号是单向传输，这样处置还可有效阻断电路或系统之间的电联系，但并不切断它们之间的信号传递。

3.6　双 DSP 通信系统的硬件设计

1. 通信接口的选择

由于在智能作战机器人中央联合控制系统的硬件设计上传感探测和运动控制部分分别采用了 DSP C6000 和 DSP C2000 两块不同的处理芯片，两者之间有重要的数据信息来往，因而两者之间高效可靠的数据传输是实现整个系统正常运行的重要保证。通过分析 C6000 与 C2000 的硬件架构，发现两者间的硬连接接口方式可以有多种，如串口

(UART) 连接、USB 连接、以太网 (Ethernet) 连接、HPI 并行连接、I^2C 总线连接等。表 3.4 中给出了这几种信号传输接口的性能比较。

表 3.4 信号传输接口性能比较一览表

接口	优　　点	缺　　点
UART	简单，成本低，易实现	速度慢，难以保证误码率
USB	速度快，可靠性高	实现 USB 协议难度较大，设计较复杂
Ethernet	速度快，通信距离远，使用灵活	实现难度大，需额外增加器件，占用较多 CPU 资源
HPI	速度快，可以实现大量数据的传输	并行连接占用芯片的过多硬件资源
I^2C	采用片内总线，接口简单可靠，不占用芯片额外资源	需要芯片支持 I^2C 接口或协议，传输距离不宜太远

从表 3.3 可以看出，I^2C 为片内总线接口，其接口连接简单可靠，非常适合于短距离高效通信。由于硬件系统有两块 DSP 芯片，将双 DSP 做在同一块 PCB 上可以大大减小控制板卡的尺寸，降低电磁干扰，提高整个系统的可靠性。同时，DM6437 和 F28015 片上都拥有 I^2C 模块，而 I^2C 通信是一种简捷高效的片内总线，不占用芯片额外资源。除了通信可靠性高外，该接口的硬件设计难度也较小。因此，最终确定在本系统中采用 I^2C 接口为双 DSP 的通信接口方式。

采用 I^2C 总线标准的 I^2C 器件，其内部不仅有 I^2C 接口电路，而且实现了将内部各单元按功能划分为若干相应独立的模块，通过软件寻址实现片选，减少了器件片选线的连接。I^2C 总线应用系统的组网方式非常灵活，如 1 个主 MCU 和几个从 MCU 或 1 个主 MCU 和几个 I/O 设备可以构成多种系统。大多数系统中，只用 1 个主 MCU 来控制挂在 I^2C 总线上的所有被控器。I^2C 总线系统的典型电路如图 3.17 所示。

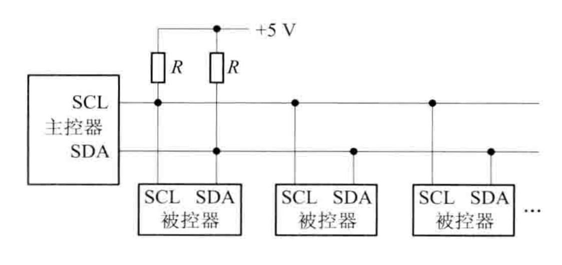


图 3.17 I^2C 总线典型接口电路结构

2. **通信接口的硬件连接**

由于 F28015 和 DM6437 的内部均有 I^2C 接口单元，因此，在两者之间 I^2C 总线接口的电路设计上只要将两者的对应引脚 I^2C_CLK（对应 I^2C 中的 SCL 线）和 I^2C_DATA（对应 I^2C 中的 SDA 线）连接起来即可。双 DSP 芯片的 I^2C 总线接口硬件连接如图 3.18 所示。

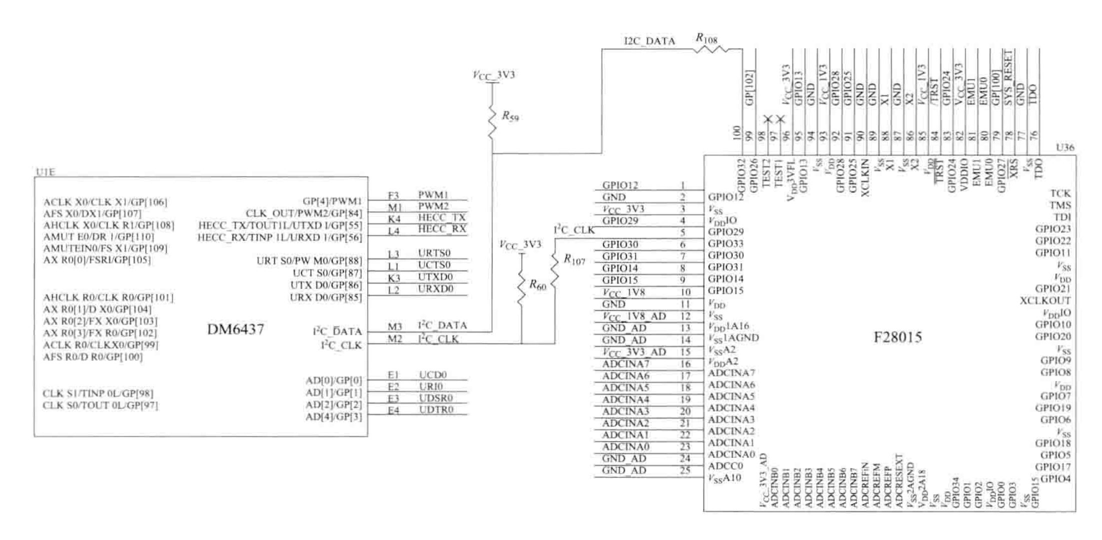


图 3.18　双 DSP 芯片 I²C 总线接口硬件连接

各引脚连接说明如下：

① DM6437 的 M3 和 M2 引脚分别对应 I²C_DATA 和 I²C_CLK，而 F28015 的 GPIO32 和 GPIO33 可以分别复用为 I²C_DATA 和 I²C_CLK。考虑到阻抗不匹配等因素会影响总线数据的传输效果，因此，在将两块芯片的 I²C_DATA 和 I²C_CLK 引脚直连时，应该在直连线路上各串联一个小电阻（R_{108}和 R_{107}）。

② I²C_DATA 和 I²C_CLK 是双向电路，必须都通过一个电流源或上拉电阻连接到电源电压的正端。由于 DSP 的输出 CMOS 电平为 3.3 V，所以，在硬件设计时，将 I²C_DATA 和 I²C_CLK 总线通过上拉电阻 R_{59} 和 R_{60} 连接到了 3.3 V 的 V_{CC} 电源上。

3.7　电源管理模块的硬件设计

1. 电源管理模块系统的组成

在智能作战机器人各个子系统中，电源系统占有重要位置，担负着为其他子系统和有效载荷提供电力的重任。电源子系统供电质量的优劣直接影响到智能作战机器人的工作状态。由于智能作战机器人受到体积、重量、环境等因素的限制，电源系统所携带的能源有限。因此，为了满足一定持续作业时间的要求，可采用两种技术措施：一是增加装置的电池容量；二是降低装置的能量消耗。第一种方法虽然简便易行，但所增加电池的体积和重量将会挤占智能作战机器人宝贵的空间和负载资源，有可能会在装置的整体性能上“得不偿失”。第二种方法由于是“节能挖潜”，合理利用能源，所以具有良好的可行性和极大的发展空间。

通过反复探索，提出在智能作战机器人中央联合控制系统中添加电源管理模块，根

据各子系统成分的工作特点，该模块有选择地把智能作战机器人闲置的子系统成分置于低能耗的休眠状态，从而有效提高了能源的利用率。同时，在其电源管理电路中考虑可靠性设计，以避免在失效情况下供电任务的失败。智能作战机器人电源管理模块的系统组成如图 3.19 所示。

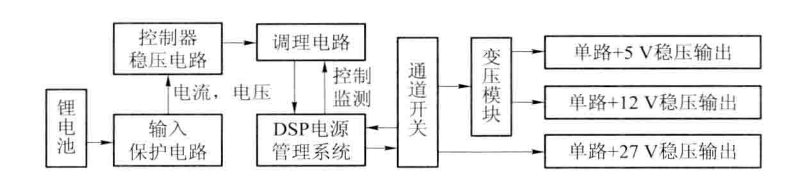


图 3.19 智能作战机器人电源管理模块的系统组成

在电源系统蓄电池的选择上，也做了充分的调研。据分析，与镉镍、氢镍电池相比，锂离子电池具有能量高、体积小、充放电效率高、无记忆效应、热效应小、自放电小等优点，因此，智能作战机器人的蓄电池选用锂离子电池。电源管理模块由管理控制芯片、保护电路、调理电路和变压模块等部分组成，在蓄电池组和用电设备之间起着承上启下的桥梁和纽带作用。通过对其合理设计，可有效提高系统的工作特性，进而降低智能作战机器人整体的功耗水平。另外，根据各子系统的工作需要，该模块可提供 3 种不同的工作电压：

① 单路＋5 V 输出。主要用于多媒体信息处理芯片 TMS320DM6437 和主控芯片 TMS320F28015 的供电。

② 单路＋12 V 输出。主要用于如图像采集等传感器部分的供电。

③ 单路＋27 V 输出。主要用于点火装置和步进电动机及其电动机驱动器的供电。

2. 电源管理系统的可靠性设计

电源管理系统的可靠性会直接影响智能作战机器人的工作性能，甚至削弱其应有的作战能力。智能作战机器人是在非结构环境下作战，因此，在安全性方面比普通机电一体化装置有更高的要求。智能作战机器人是经过高空抛撒而着陆展开，要求系统有较强的抗震能力。另外，因其内部空间有限，电子器件密集，还会产生电磁场干扰。在硬件设计上应从抗干扰、过电流保护和滤波等多方面考虑。

（1）硬件抗干扰措施

在电路抗干扰设计上，采用在电路中加相应的滤波器来保证数据采集的准确性，利用屏蔽接地使空间电磁场的干扰降到最低点，在单片机与继电器之间的电路中采用 6N139 高倍率达灵顿光耦合 IC（图 3.20），这样有效地实现了控制信号的电平转换。继电器采用欧姆龙公司的 G4F－11123T 型功率继电器，继电器结点电流最大值为 20 A，电气寿命达 20 万次以上，同时继电器使用难燃的绝缘材料，能够在发生意外条件下避免损坏整体电路性能。

（2）过电流保护措施

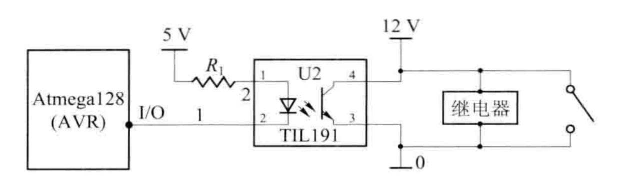


图 3.20　6N139 连接方式

为了保护控制芯片和其他硬件，在电源上专门设计了过电流保护电路。该电路由采样电路和放大比较电路两部分组成。根据额定电流和电流采样电路的特点，选取温度系数低、载流能力强、精度高的锰铜丝作为采样电阻。为防止上电启动过程中过流保护电路产生误动作，在采样电路中增加了低通滤波，将瞬间产生的纹波电压滤除。电压放大比较电路中的采样电压值经过运算放大器进行放大，采用的电压比较器 LM339 具有低功耗、低失调的特性，基准电压的大小由可调电阻调整，同时，正反馈射极跟随器的引入制造了一定的回差，避免了过流点附近电流波动引起的不稳现象。

（3）调理电路的设计

调理电路可看作硬件滤波电路，它包括信号放大器、滤波电阻、电容、电感等。调理电路对准确采集信号作用很大，因为它可阻止干扰信号进入 DSP 的 A/D 模块。为了实现电源地与 A/D 参考地的隔离，采用了一种基于光耦的隔离调理电路。该电路的核心是型号为 HCNR200 的高精度（±0.01％的非线性度）线性光耦。基于 HCNR200 的隔离电压采样调理电路如图 3.21 所示。

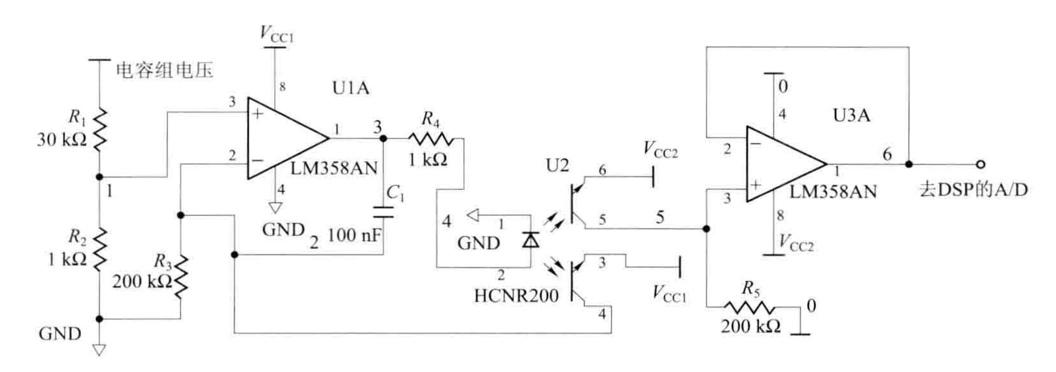


图 3.21　隔离电压采样调理电路

由图 3.21 可知，HCNR200 由发光二极管（LED）和光敏二极管（PD1、PD2）组成。当 LED 中通过电流 I_F，会发出红外光，PD1 受到照射产生控制电流 I_{PD1}，形成负反馈，PD2 受到照射产生输出电流 I_{PD2}。I_{PD1}、I_{PD2} 分别与 I_F 呈线性比例关系，所以 I_{PD2} 与 I_{PD1} 也呈线性比例关系，设比例为 K。当 HCNR200 制造完成后，K 值就固定下来，K 在 0.85～1.15 之间。该电路将输入与输出通过光电耦合，消除了干扰源通过连接地耦合到 A/D 的可能。

3.8 中央联合控制系统的软件设计

为了使智能作战机器人中央联合控制系统各硬件设备能够正常运行，从而有效控制系统运转并发出实时控制和管理信号，除了要设计合理的硬件电路外，还必须要有高质量的软件支持。编写好控制系统的应用程序，将是智能作战机器人整个控制系统设计中极其重要的组成部分。在控制系统中，控制任务的实现最终是靠应用程序来完成的。应用程序设计的质量好坏，将直接决定整个控制系统的控制质量和运行效率。因此，在应用程序设计之前，必须了解应用软件设计的基本要求和原则，主要有以下三点：

① 实时性。所谓实时性，是指必须在一定的时间限制内，完成一系列的软件处理过程，如对电动机被控参数进行采样、计算、处理并输出控制信号以及对突发故障进行处理等。

② 可靠性。软件的可靠性是指软件在运行过程中避免发生故障的能力，以及一旦发生故障后的解脱和排除故障的能力。为了提高软件的可靠性，软件设计时应考虑系统在工作过程中可能出现的一切非正常情况。

③ 修改性。一个好的完整的控制软件，都不是一次就能设计和调试完成的。因此，软件在一开始总体设计时，就必须进行良好的结构设计，以利于提高软件在反复调试、修改和补充过程中的效率，并保证最终完成的软件仍具有简洁明了的结构。

1. 控制系统的软件功能分析和流程设计

（1）软件功能模块化设计

智能作战机器人中央联合控制系统通过弹载计算机将传感器与执行机构联成一个整体，构成一个闭环系统。弹载计算机通过弹载软件处理传感器数据，实现控制规律，管理任务设备，实现自主扫描、识别和定位，并完成相应的攻击任务。因此，为了能够在硬件平台的基础上高效、准确地完成作战任务，软件设计无疑是中央联合控制系统设计的重要环节，系统整体性能的好坏在很大程度上取决于软件设计的优劣。

在编写系统软件时，为了便于系统扩展和易于维护，以智能作战机器人的工作任务为对象，系统软件采用基于 DSP 的控制软件模块化设计，一方面对控制系统所需实现的功能进行软件结构化设计，另一方面实现芯片各模块配置及接口协调关系的设计。

采用模块化设计方法，可以首先用主程序、子程序、子过程等框架把软件的主要结构和流程描述出来，然后定义和调试好各个框架之间的输入、输出链接关系，进而得到一系列以功能块为单位的算法描述。最终降低程序复杂度，使程序设计、调试和维护等操作简单化。由于模块化设计对软件系统的相对封闭独立性、可重复性、可修改性和统一性等要求比较高，这就要求在软件开发前期要做好详尽的策划，从目录结构、命名规范，到全局和特例的界限划分、后期修改的宽容度估计等都应统筹规划。

（2）控制软件的编程及链接

采用 TI 公司的 DSP 芯片汇编语言编写程序来完成对寄存器的赋值、I/O 口数据传输和控制等面向硬件的操作是很方便的，几条指令就可以实现。但不同的 DSP 芯片其汇编指令是不同的，使得使用者必须首先熟悉其指令，才能完成相关的软件编写工作，这势必会延长开发周期。由于采用 DSP 总是与实现一定的数字信号处理功能相联系，这就可能涉及复杂算法的实现问题，如果采用汇编语言来实现复杂算法，其工作量和难度将会很大，而采用 C 语言这一高级语言，充分利用编译器的库函数实现算法功能就相对更简单。但由于并非所有的 C 语言编译器提供的库函数都包含像 I/O 操作、读和写寄存器的指令，因此，在具体的工作中，还要考虑采用 C 语言与汇编语言的混合编程。

根据高级语言 C 编程容易程度及汇编语言对硬件操作方便的特点，决定采用 C 语言与汇编语言混合编程的方法，即主程序部分采用 C 语言编写，而与硬件联系密切的部分则采用汇编语言编写，同时，部分 C 程序中嵌入汇编语句，从而大大减少了编程工作量，有效缩短了软件的开发周期。

智能作战机器人中央联合控制系统采用了 TI 公司的 CCS V3.3 作为相关程序的开发环境，将编写好的模块进行链接，然后把它们分别转化成 DSP 的汇编语言并传到编译器进行编译，生成目标文件，再将目标文件送入链接器进行链接，得到可执行文件。最后通过 CCS 烧写插件将程序烧写进控制系统的 DSP 硬件中，最终完成软件系统设计。

（3）控制系统主程序设计

智能作战机器人为了满足反洞库目标作战的特殊要求，必须具有动作精准、稳定性高、实时性好等性能。智能作战机器人中央联合控制系统在工作过程中实现对各模块子系统程序的自主、协调运行，通过对工作环境与状态的实时判定，发出相应 DSP 触发控制信号，完成特定的工作任务。例如，运动云台系统的电动机控制信号输入就来自探测子系统。此外，控制系统的软件功能还决定着自毁子系统、点火电控子系统的适时触发等工作时序。

2. 运动云台控制系统的软件设计

通过探测子系统采集到的图像信息，经过图像识别处理芯片 DM6437 的相关算法进行识别处理确认后，将返回给控制系统两个非常重要的控制信息：俯仰角的角度值 φ 和水平角的角度值 θ。控制系统将根据这两个角度信息来实现对目标的快速精准定位。因此，运动云台系统控制程序的关键在于如何控制电动机快速准确运行，从而驱动运动云台系统使战斗部筒体能够迅速锁定目标位置。

（1）电动机的运动控制算法

控制系统要实现对执行机构的精确定位，就必须保证执行电动机的运动精度。步进电动机最常用的场合就是快速精确定位，但必须保证它在运行过程中不失步或过冲。在

实际应用中，步进电动机有启动频率和运行频率两个参数，通常启动频率远低于运行频率，而且随着负载的增加而降低。当电动机启动时，若高于启动频率，电动机将会失步，无法正常运转，而且还会产生噪声，严重的还会损坏电动机。在要求快速响应的控制系统中，如何保证步进电动机在启停和频率发生突变的高速运动中不发生失步和堵转现象就成了电动机控制的关键问题。而要解决上述问题，常用的恒频控制方法是不可取的，这就必须对控制方法进行改进，采用与电动机矩频特性相适应的运动控制方案。

目前，比较实用的控制方法为加减速控制，即要求电动机首先以较低的速度启动，获得较大的转矩以实现正常启动，而后逐渐加速到某一速度运行，达到最大值后保持高速运行，在快要停止时再逐渐降速至停止，从而在高速、准确的前提下有效避免了丢步和过冲。一般的加减速运行会按照某一种规律来进行，这种规律可通过电动机固有的机电特性来探索。对于步进电动机，其动态特性可通过其动力学模型（二阶微分方程）描述：

$$J\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}+\beta\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}+K\theta+T_\mathrm{z}=T_\mathrm{d} \tag{3.1}$$

式中，J 为系统总转动惯量；θ 为转子转角；β 为阻尼（包括机械阻尼和电磁阻尼）系数；K 为与 θ 成某种函数关系的比例因子，$K\theta$ 值变化范围很小；T_z 为摩擦阻力矩及其他与 β 无关的阻力矩之和；T_d 为步进电动机所产生的电磁驱动转矩。

由式（3.1）可得系统的惯性扭矩 T_ε 为：

$$T_\varepsilon=J\varepsilon=J\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}=T_\mathrm{d}-\beta\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}-K\theta-T_\mathrm{z} \tag{3.2}$$

由于驱动脉冲的频率与转子的角速度成正比关系，容易推导出来，角加速度 ε 是步进脉冲频率 f 的一次方程，即：

$$\varepsilon=\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t}=A-Bf \tag{3.3}$$

式中，A、B 是和电动机本身特性相关的两个待定常数。

对式（3.3）进行拉氏变换后得到：

$$sF(s)-f_0+BF(s)-\frac{A}{s}=0 \tag{3.4}$$

整理后，得到：

$$F(s)=\frac{A}{s(s+B)}+\frac{f_0}{s+B} \tag{3.5}$$

通过反变换并整理后有：

$$f(t)=\frac{A}{B}+\left(f_0-\frac{A}{B}\right)\mathrm{e}^{-Bt}=f_0+C(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}) \tag{3.6}$$

式中，$C=A^{\tau}-f_0$；$\tau=\dfrac{1}{B}$，为时间常数。

由式（3.6）可以看出，该频率-时间函数为指数函数，说明符合步进电动机矩频特性的控制曲线应该为指数曲线。因此，智能作战机器人控制系统的电动机升降频控制曲

线最终确定为指数型加减速曲线。

由于步进电动机的运行方式是步进的，所以必须对式（3.6）进行离散化处理，即步进电动机驱动器应当发出一个频率变化规律如式（3.6）所描述的驱动脉冲序列。设在 t 时刻，步进电动机控制器发出第 n 个脉冲：

$$n(t)=\int_0^t f(t)\mathrm{d}t=\int_0^t\left[f_0+C(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}})\right]\mathrm{d}t=(f_0+C)t+\tau C(\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}-1) \quad (3.7)$$

根据式（3.7），利用牛顿迭代法求解控制器发出第 n 个脉冲的时刻：

$$t_{k-1}=t_k-\frac{(f_0+C)t_k+\tau C(\mathrm{e}^{-\frac{t_k}{\tau}}-1)-n}{f_0+C-C\mathrm{e}^{-\frac{t_k}{\tau}}} \quad (3.8)$$

将式（3.8）迭代若干次，就能求得足够精确的 $t(n)$，然后将之代入式（3.1），可以求得每一个 n 所对应的 $f(n)$。

以上的离散化方法为常规离散化方法，其计算值准确，但因为计算量巨大，且难以操作，在实际应用中并不多用。实际处理时，考虑到 $f_m \approx f_0$，一般可以做这样的近似处理：

$$C \approx f_m \quad (3.9)$$

直接离散化替换处理，令 t_n 代替 t，由式（3.1）和式（3.9），则有：

$$f(t_n) \approx f_0+f_m(1-\mathrm{e}^{-\frac{t_n}{\tau}}) \quad (3.10)$$

因此，可以根据式（3.10），由 t_n 的不同取值来确定每一阶的起始时间和对应的频率点（f_n，t_n）。以频率 f_n 运行 Δt 时间后，频率往上增加 Δf，进入下一个频率段 f_{n+1} 继续运行，如此操作，直至达到最大速度。这种离散化的方法的关键在于合理选取所需的点，由点再确定相关数据，近似指数型加速阶段曲线离散示意图如图 3.22 所示。

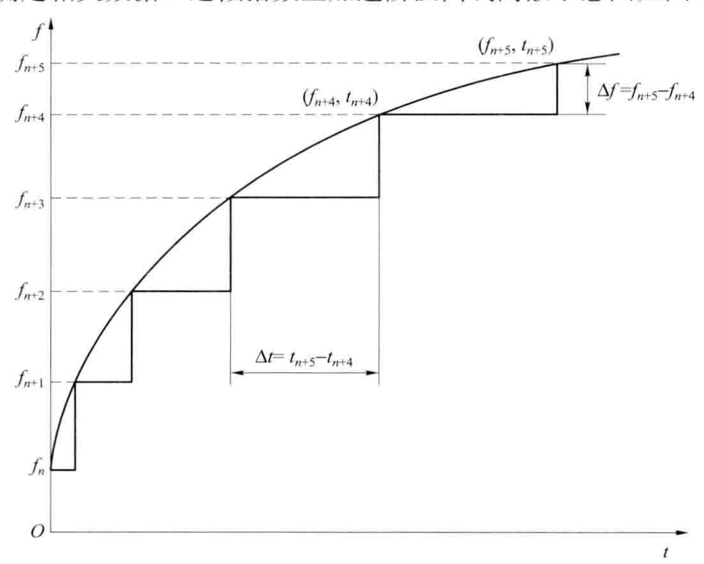


图 3.22　指数型加速曲线离散取值示意图

由图 3.22 可知，离散后的加速曲线并非一直上升，而是每升一级都要在该级上保持一段时间，即走若干步，因此，实际加速轨迹呈现阶梯状。在实际应用中，只需根据电动机自身特点，结合实际使用情况合理地选择阶数 N、Δf 和 Δt 等参数，确定出每一阶脉冲的频率值和对应的脉冲个数，并制成表格以备后期查询调用。为了简化工作并提高效率，减速时一般采用与加速相同的方法，减速过程是加速的逆过程。

（2）运动云台系统精确定位的实现

以运动云台系统在俯仰方向上转过 80°为例。系统传动比 $i=70$，俯仰运动驱动电动机转过 5 600°，电动机的步距角为 1.8°，系统时间响应指标为 5 s，综合考虑细分数对步距精度、电磁转矩及电动机共振等的影响，选取最佳细分数 10，由电动机矩频特性曲线及启动特性知启动频率 $f_0=0.5$ Hz，最大运行频率 $f_m=6$ kHz。根据前述方法并结合电动机自身特点，设计加速阶数为 10，得到一组加速过程各阶参数数据见表 3.5。

表 3.5　俯仰运动驱动电动机加速过程各阶相关参数表

阶数 n	频率 f/kHz	对应周期 T/ms	脉冲数 m/个
1	0.5	2	32
2	0.8	1.25	52
3	1.3	0.769	69
4	2.2	0.455	76
5	3.2	0.313	83
6	4.0	0.25	87
7	4.9	0.204	92
8	5.4	0.185	102
9	5.8	0.172	117
10	6	0.167	—

由表可知，整个加速阶数走过的总脉冲数为 720，走过的总角度为 129.6°，加速历时 0.322 s，由于加速过程与减速过程相反，可计算得匀速历时 3.093 s，整个过程耗时 3.737 s，满足系统的时间响应指标。此时的运行曲线如图 3.23 所示。

当电动机运行角度非常小时，可不采用加减速运动方式。若电动机始终以启动频率 f_0 恒速运行，则运行 4 s 时电动机转过的角度为 360°，即当电动机转角不大于 360°时，以频率 f_0 运行既可在规定时间 4 s 内完成任务，又可保证运行精度。因此，当在俯仰方向转动 $\varphi\leqslant 360°/40=9°$时，系统可以按照匀速加载曲线运行，只是随着 φ 的不同，匀速阶段持续的时间也有所不同，电动机匀速运行时的运行曲线如图 3.24 所示。当俯仰方向上运行角度大于 360°时，可采用加减速方式运行，对于不同的运行角度，仅匀速阶段的持续时间不同。

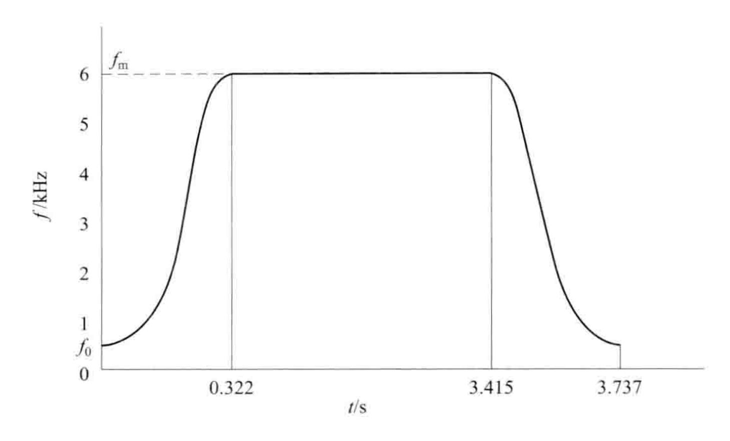


图 3.23　俯仰角方向转动 80°时的运行曲线（此类曲线适用于 $9° < \varphi \leq 80°$）

（3）基于 DSP 的电动机控制途径

其主导思想是希望 DSP 芯片能够按照指令要求发出相应个数的脉冲和相应频率的脉冲，步进电动机驱动器再根据 DSP 发出的脉冲频率和个数来对电动机进行相应控制。从 DSP 的输出端来看，产生合理的 PWM 波形是实现电动机控制的关键。在 F28015 芯片上，可以通过两个途径来产生特定的脉冲波形，一种是通过通用定时器产生 PWM 波形。为了得到对称的 PWM 波形，可以采用连续增/减计数模式，根据所需要的 PWM 波形，设置 TBPRD 寄存器，然后设置 TBCTL 寄存器，确定计数器模式和时钟源，并启动 PWM 输出操作，最后将软件计算出来的 PWM 脉冲宽度（即占空比）装载到 CMPA 或 CMPB 寄存器中。其 PWM 产生的原理是通过将比较寄存器中存放的值不断与周期寄存器中存放的值进行比较，当发生匹配时，PWM 使出引脚第一次跳变，跳变后保持到下一次比较匹配，波形示意图如图 3.25 所示。

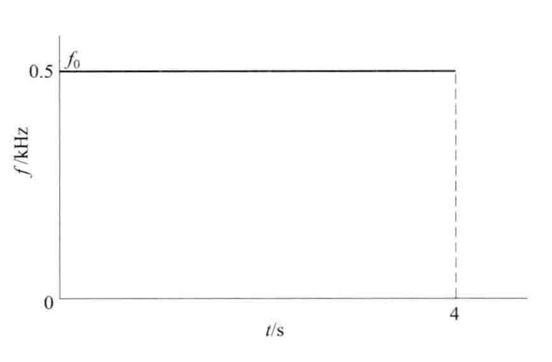


图 3.24　俯仰角方向转动 9°时的运行曲线（此类曲线适用于 $0° < \varphi \leq 9°$）

这种产生 PWM 的办法比较简单和直接，只要不断改变比较寄存器和周期寄存器中存放的值就可以获得满意的脉冲波形，而且占用内存少。另外，由于 F28015 有 4 个 PWM 定时器，因此，利用这种方法能同时输出 4 路波形，可以完成多电动机的协调工作。但是这种方法控制脉冲个数的能力稍弱，一般只能通过改变运行时间来控制脉冲的个数，但这样得出的脉冲个数会产生一定的误差，因为 DSP 运行时，内部会有很多自动中断，周期上溢、下溢中断等都要消耗时间，这样必然会使产生脉冲的时间减少，从而影响脉冲个数的输出，这对步进电动机的控制是很不利的。另一种是用强制拉高和拉低 PWM 输出端口电压的方式来产生脉冲方波。比如俯仰角电动机采用 EPWM1A（即

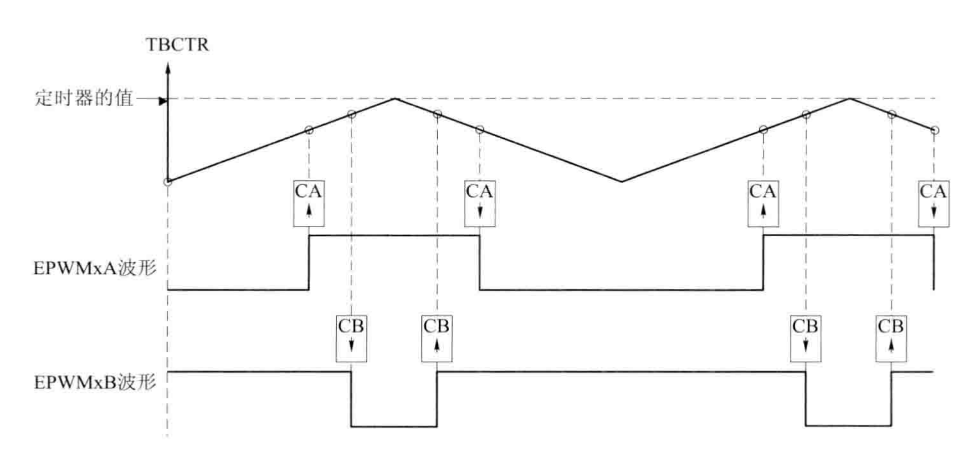


图 3.25 连续增/减模式下的通用定时器比较 PWM 输出

GPIO0）端口作为脉冲输出端口，可以在配置 I/O 口时，将该端口强制拉高，延时之后再对该位强行拉低，这样也可以得到合适的脉冲波形。但在设计相关程序时，先要对 I/O 口进行如下的初始化处置：

```
EALLOW;
GpioCtrlRegs. GPAMUX1. all = 0x00000000;     // 所有 I/O 口都配置为第一功能
GpioCtrlRegs. GPAMUX2. all = 0x00000000;
GpioCtrlRegs. GPADIR. all = 0xFFFFFFFF;      // 所有 I/O 口都配置为输出
GpioCtrlRegs. GPBDIR. all = 0x0000000F;
EDIS;
```

对 F28015 的 I/O 口初始化结束后，根据角度的要求，需要几个脉冲，就可以对下面的程序做几次循环：

```
GpioDataRegs. GPADAT. all =0x00000001;       // GPIO0 置高
delay_loop (nTime);
GpioDataRegs. GPADAT. all =0x00000000;       // GPIO0 置低
delay_loop (nTime);
```

用这种办法的缺点是占用内存空间比较大，输出的 PWM 波形也没有第一种方法那样逼真和精确，并且同一时刻只能输出一路波形。同时，由于延时函数的反复调用，这种方法也比较占用 CPU 的资源。但是，用这种方法能够很好地控制脉冲个数，这对步进电动机的控制来说是至关重要的。该法在实际使用时的效果要好于第一种方法。因此，采用第二种方法来产生脉冲方波。

（4）软件控制程序的流程设计

由于每路电动机工作时转角大小的不确定性和两路电动机转动范围的不同，在完成电动机加载曲线的计算后，为了保证运行的快速性、可靠性和准确性，在软件设计上，

根据电动机运行距离长短的不同，采用如下 3 种运行方式。

① 短距离：由于运行距离短，电动机转速来不及升至最高速，此时以接近启动频率匀速运行，只需根据运行角度和电动机的步距角即可得到运行的总脉冲数，无加减速运行过程。

② 中距离：在这样的距离里，电动机只有加减速过程，而没有恒速过程。

③ 中长距离：加减速和匀速过程并存。由于距离较长，为缩短用时，保证系统的快速反应性，在加速时，尽量接近启动频率启动；在恒速时，尽量工作在最高速。编写程序时，可将数据制成数据表以供查询。程序在执行时，速度每变换一挡，查取此台阶应走的步数，然后以递减方式检查直至运行完毕，再换至下一挡继续运行。

电动机控制程序流程如图 3.26 所示。

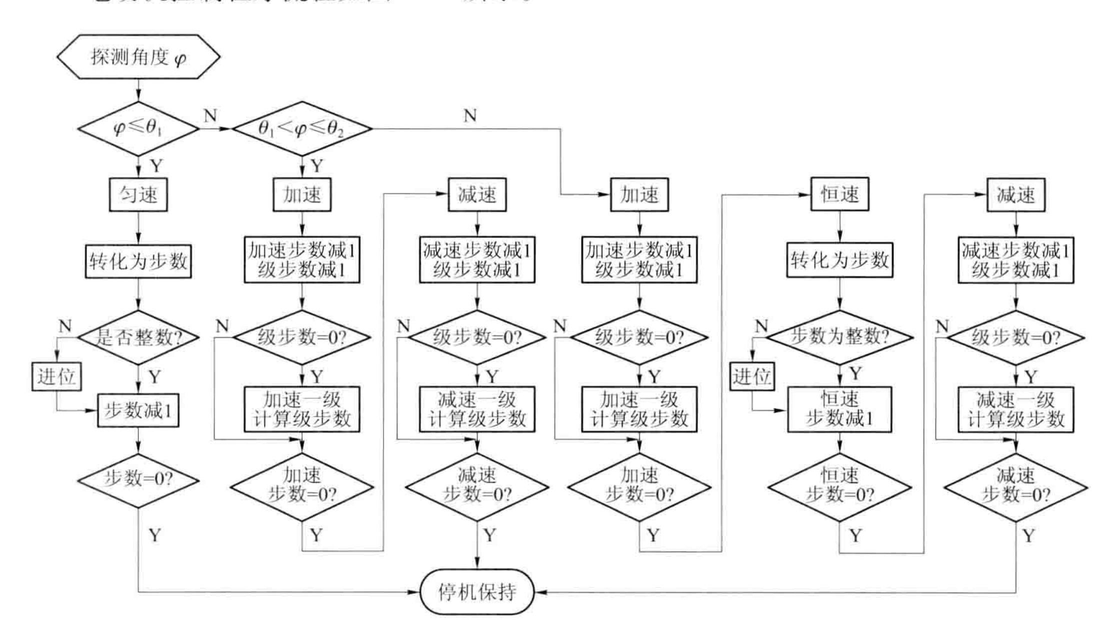


图 3.26　电动机控制程序流程图

通过 DM6437 处理得到的俯仰角 φ 值，经 I^2C 总线传送给 F28015，并被存入 F28015 的某一个变量空间中。电动机控制程序读取该变量空间存放的数值后，通过与该角度值的比较，确定出应采用的匀速、加速-减速或加速-匀速-减速的运行方式，从而高效可靠地完成运动云台系统的相关工作任务。

3. **电控点火系统的软件设计**

（1）电容功率源充放电模型的建立

在智能作战机器人电控点火系统中，如何精确地控制电容的充放电时间、电容的充电时间是否足够快、电容放电电压和电流能否基本保持稳定等问题是决定 SCB 能否成功点火的关键。充放电时间即为 IGBT 触发脉宽与占空比的选择，当栅极有电压时，回

路导通充电，反之则断开电容进行放电，因此，触发脉冲的宽度必须足够使电容充电完全，因而电容充放电时间的控制即为对设计的触发脉冲的控制。为了保证电容的充电时间足够快以及电容放电时的电压和电流基本保持稳定，需根据 SCB 半导体桥的性能要求对电容和电阻的参数进行选择。

在电容功率源充电过程中，当触发器输出的脉冲没有达到 IGBT 的导通电压时，SCB 放电回路断开，充电回路导通，其电路的数学模型可描述如下。

在开始时，电路处于零初始状态，即 $U_c(0_-)=0$。在 $t=0$ 时刻，

$$RC\frac{\mathrm{d}U_c}{\mathrm{d}t}+U_c=U_v \tag{3.11}$$

解方程可得：

$$U_c=U_v(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}}) \tag{3.12}$$

$$I=C\frac{\mathrm{d}U_c}{\mathrm{d}t}=\frac{U_v}{R}\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}} \tag{3.13}$$

通过方程的解可以看出 U_c 以指数形式趋近于它的最终恒定值 U_v，到达该值后电压和电流不再变化，电容相当于开路，电流为零。

在电容功率源的放电过程中，当触发器输出电压脉冲达到 IGBT 的导通电压时，充电回路断开，SCB 放电回路导通，此时电路的数学模型可描述如下：

在 IGBT 导通接通电路之前，电容已充电，其电压 $U_c=U_v$。当接通电路后，电容储存的能量将通过电阻释放出来。电路方程为：

$$RC\frac{\mathrm{d}U_c}{\mathrm{d}t}+U_c=0 \tag{3.14}$$

解之得：

$$U_c=U_v\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}} \tag{3.15}$$

此即为电容在放电过程中电容电压 U_c 的表达式。

电路中的电流为：

$$I=-C\frac{\mathrm{d}U_c}{\mathrm{d}t}=\frac{U_v}{R}\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}} \tag{3.16}$$

从以上表达式可以看出，U_c 和电流 I 都是按照同样的指数规律衰减的，它们衰减的快慢取决于指数中 $1/RC$ 的大小。

(2) 电控点火控制程序的流程设计

智能作战机器人电控点火系统工作时，首先由点火电路上电后对系统进行状态自检，并返回检测结果。当发现目标并瞄准完成后，由控制系统发出点火控制指令，电路即判断指令是否有效，从而决定是否调用点火子程序，并将最终点火状态返回给控制系统，完成点火发射的过程。在点火子程序中，首先进行点火电路的系统初始化，然后发出控制信号，打开静电泄放开关，同时发出电容充电触发信号并延时，待充电完成后，发出点火控制信号实现电容的放电点火。电控点火系统的主程序和点火子程序的控制流

程图如图 3.27 所示。

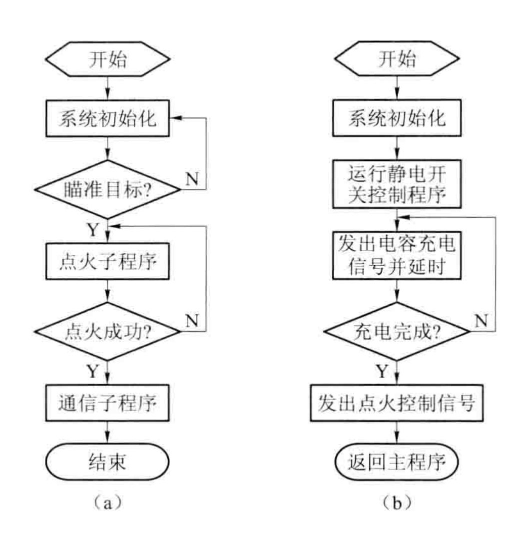


图 3.27　电控点火系统的控制程序流程图
(a) 主程序；(b) 子程序

3.9　双 DSP 系统通信程序

1. I²C 总线的数据传输与典型工作流程

I²C 总线与传统的单片机串行接口不同，它能够根据器件情况，通过软件程序使其工作于发送和接收两种状态。当某个器件向总线上发送信息时，它就是发送器（也称主器件）；而当它从总线上接收信息时，又称为接收器（也称从器件）。主器件用于启动总线上传送数据并产生时钟信号以开放传送的器件，此时任何被寻址的器件均被认为是从器件。I²C 总线的控制完全是由挂接在总线上的主器件送出的地址和数据决定的。在总线上，既没有中心机，也没有优先机。

总线上主从（即发送和接收）关系不是一成不变的，而是取决于此时数据传送的方向。当总线空闲时，两根线都是高电平。连接总线的器件的输出级必须是集电极或漏极开路，以具有线“与”功能。在 I²C 总线上传送信息时的时钟同步信号是由挂接在 SCL 时钟线上的所有器件的连接“与”完成的。SCL 线由高电平到低电平的跳变将影响这些器件，一旦某个器件的时钟信号下跳为低电平，将使 SCL 线上一直保持低电平，使 SCL 线上的所有器件开始低电平期。

当所有器件的时钟信号都上跳为高电平时，低电平期结束，SCL 线被释放返回高电平，即所有的器件都同时开始它们的高电平期。其后，第一个结束高电平期的器件又将 SCL 线拉成低电平。这样就在 SCL 线上产生一个同步时钟。可见，时钟低电平时间由时钟低电平期最长的器件确定，而时钟高电平时间由时钟高电平期最短的器件确定。

在数据传送过程中，必须确认数据传送的开始和结束。在 I^2C 总线技术规范中，起始和终止信号（也称开始和结束信号）的定义如图 3.28 所示。

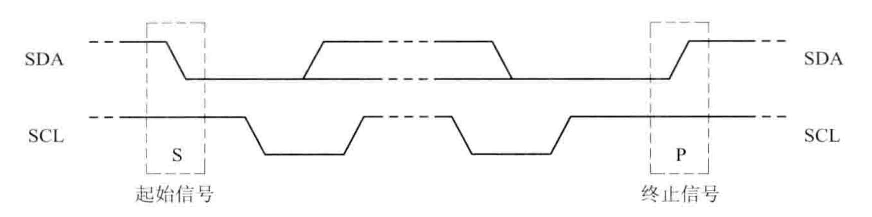


图 3.28 起始和终止信号的定义

当时钟线 SCL 为高电平时，数据线 SDA 由高电平跳变为低电平，为“起始”信号；当 SCL 线为高电平时，SDA 线发生低电平到高电平的跳变，为“终止”信号。起始和终止信号都由主器件产生。在开始信号以后，总线即被认为处于忙状态；在结束信号以后的一段时间内，总线被认为是空闲的。

在 I^2C 总线上每次传送的数据字节数不限，但每一个字节必须为 8 位，而且每个传送的字节后面须跟一个认为位（也叫应答位（ACK）），数据的传送过程如图 3.29 所示。

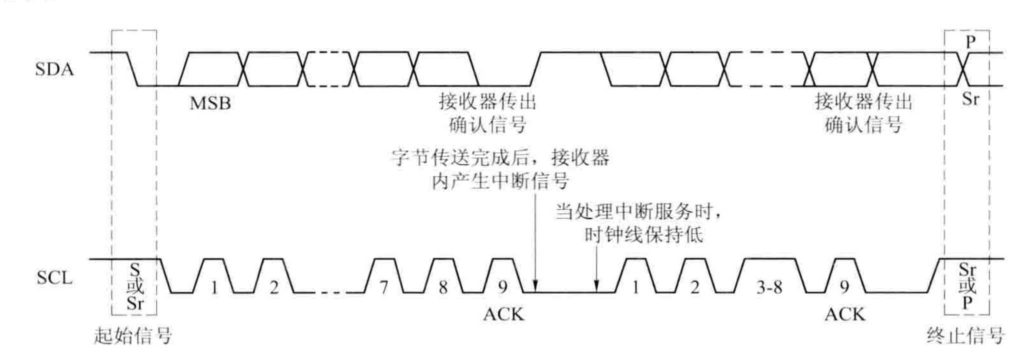


图 3.29 数据的传送过程

每次传送时都是先传最高位，通常从器件在接收到每个字节后都会做出响应，即释放 SCL 线返回高电平，准备接收下一个数据字节，主器件可继续传送。如果从器件正在处理一个实时事件而不能接收数据，可以使时钟 SCL 线保持低电平，从器件必须使 SDA 保持高电平，此时主器件产生 1 个结束信号，使传送异常结束，迫使主器件处于等待状态。当从主器件处理完毕时将释放 SCL 线，主器件继续传送。

当主器件发送完一个字节的数据后，接着发出对应于 SCL 线上的一个时钟（ACK）认可位，在此时钟内主器件释放 SDA 线，一个字节传送结束，而主器件的响应信号结束后，SDA 线返回高电平，进入下一个传送周期。

I^2C 总线的典型工作流程为：首先，由信号表明传输开始；其次，主设备发送地址信息，包含 7 位的从设备地址和 1 位的指示位（表明读或者写，即数据流的方向）；再

次，根据指示位，数据在主设备和从设备之间传输。数据一般以 8 位传输，具体能传输多少数据并没有限制，接收器上用一位的 ACK 表明一个字节收到了，传输可以被终止和重新开始；最后，由信号结束传输。

2. I^2C 总线的双 DSP 通信原理

对于 DM6437 和 F28015 来说，由于它们的芯片内部均自带 I^2C 引脚和 I^2C 功能寄存器，这使得它们之间的 I^2C 通信实现变得比较简单。DM6437 和 F28015 有着相同名称的 I^2C 寄存器，只是寄存器的地址稍有不同（图 3.30）。DM6437 和 F28015 在利用 I^2C 总线传输数据时，会用到 4 个很重要的寄存器：I^2CXSR、I^2CRSR、I^2CDXR、I^2CDRR。其中前两个寄存器直接挂在 SDA 线上，I^2CXSR 寄存器可以将存在其内部空间的数据发送到 SDA 线上，而 I^2CRSR 可以读取 SDA 线上的数据，并把数据存在自己的内部空间里，当然，发送和接收的过程也受 SCL 线上的脉冲信号的时间同步和线"与"关系的影响。I^2CDXR、I^2CDRR 两个寄存器与 I^2CXSR、I^2CRSR 两个寄存器分别有通道连接，I^2CDXR 可以将自身的数据发送到 I^2CXSR 中，而 I^2CDRR 则可以读取 I^2CRSR中的内容。由于 CPU 不能直接读取 I^2CRSR 和 I^2CXSR，所以数据的发送和接收过程中，实际工作都是通过 CPU 多次对 I^2CDXR 和 I^2CDRR 两个寄存器进行操作来实现的。

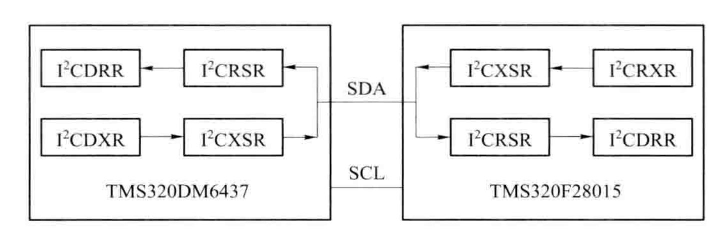


图 3.30　双 DSP 的 I^2C 通信原理示意图

现以 DM6437 按 8 位传输模式向 F28015 发送一个 n 位数据 DATA 为例，来说明 I^2C通信的原理。当 DM6437 要发送数据 Data 给 F28015 时，需要调整 SDA 线和 SCL 线上的信号，对所发送的数据 Data 进行如下处理：

① 将数据的头和尾分别加上起始位 S 和终止位 P；

② 在起始位后加上要传送给的目标地址；

③ 在地址的后面加上 R/W 标志位；

④ 根据每次传输的位数 8，将数据分为若干段，每段后面加一个确认位 ACK。

处理后的数据格式如图 3.31 所示，它就是最终要在 I^2C 总线上传送的数据。

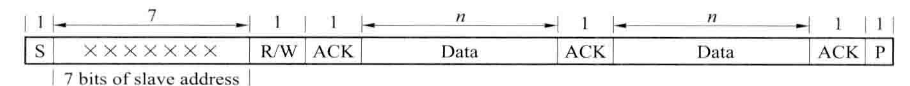


图 3.31　I^2C 数据传输格式示意图

处理后的数据按照一定的速率发送到 SDA 线上，每成功发完一段数据后，DM6437 的 I^2C 中断寄存器的一些标志位将会被置位，可以通过查询这些中断标志位来检验发送效果，也由此决定是继续发送还是终止发送数据。数据发送到 F28015 端后，F28015 的 I^2C 模块开始按照配置好的工作模式接收数据，每接收成功一段数据后，F28015 的 I^2C 中断寄存器的一些标志位也会置位，可以根据这些中断标志位来判断接收效果以及适时对接收的数据进行相关处理。

3. 信程序的流程设计

为了完成数据通信，需要在双 DSP 上分别编写通信程序并运行，而且在配置各自 I^2C 功能时，要特别注意其工作模式的匹配性。以双 DSP 系统的一个数据发送和接收来回为例，每个 DSP 系统内部都必须至少有数据接收子函数、数据发送子函数这些基本的功能函数。若以 DM6437 作为主机，F28015 作为从机，则分别在两者中运行的 I^2C 通信程序总体流程可用图 3.32 来表示。在 F28015 的 I^2C 通信程序中，I^2C 相关寄存器的配置将直接关系到 I^2C 总线的工作方式和工作效果。I^2C 寄存器的配置工作是通过初始化函数 I^2CA_Init（ ）来实现的，其部分核心代码如下：

```
I2caRegs. I2COAR = 0x00CD;            // F28015 的自身地址定义
I2caRegs. I2CPSC. all = 9;            // I2C 模块时钟采用 10 分频模式
I2caRegs. I2CCLKL = 10;               // 低电平的保持时间下限
I2caRegs. I2CCLKH = 5;                // 高电平的保持时间下限
I2caRegs. I2CCNT = 1;                 // 按字节方式计数
I2caRegs. I2CIER. all = 0x18;         // 允许数据传送和接收准备位中断
I2caRegs. I2CSTR. bit. RRDY = 1;      // I2CDDR 准备好，数据已从 I2CRSR 拷贝
I2caRegs. I2CMDR. all = 0x0020;       // 每次传 8 位，使能 I2C 模块
```

初始化系统时钟、看门狗定时器、中断等
配置 I^2C 相关寄存器，确定 I^2C 总线工作方式
发送16位数据信息
打印发送数据信息
监听和接收数据信息
打印返回的数据信息
程序结束并返回

（a）

系统初始化
将GPIO32和GPIO33端口配置成 I^2C 接口
初始化PIE中断控制寄存器和PIE中断向量
指定中断函数入口地址，开中断
配置 I^2C 相关寄存器，确定 I^2C 总线工作方式
执行数据接收、处理和传送子函数

（b）

图 3.32 双 DSP 中的 I^2C 通信程序整体流程图

（a）DM6437 通信程序；（b）F28015 通信程序

F28015 中的数据接收、处理和发送子函数是在 I^2C 的中断服务子函数中通过查询相关标志位来调用的，它们是整个通信程序的核心部分。数据接收、处理和发送子函数的流程图如图 3.33 所示。

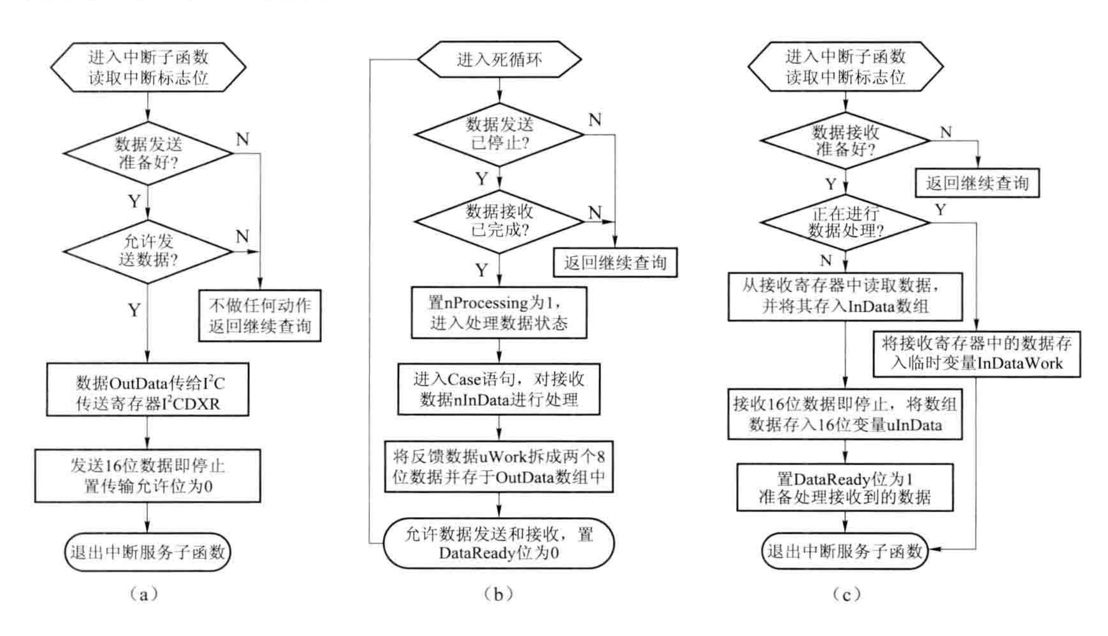


图 3.33　F28015 数据接收、处理和发送子函数的流程图
(a) 数据发送流程图；(b) 数据处理流程图；(c) 数据接收流程图

3.10　电源管理系统的软件设计

在智能作战机器人能源系统的构成上，尽管采用了低电压、低功耗的器件，并采用了具有高可靠性的电源管理模块，在一定程度上降低了系统的功耗，但这些仅仅完成了硬件上所能采取的常规措施，要想实现更为有效的系统降耗设计，还必须与良好的电源管理方法和合理的软件设计技术相结合。根据智能作战机器人各子系统的工作特点，采用固定超时动态管理算法，有针对性、有选择性地把一些闲置子系统置于低能耗状态，从而有效地提高能源的利用效率，最大限度地节约系统能源。

1. 电源管理技术的研究

电源管理可以分为静态管理和动态管理。静态电源管理技术的管理方法在设计阶段已经确定，而动态电源管理技术是根据系统实际运行的工作量来决定电源使用的状况。最普遍、最简单的动态电源管理方式是关闭系统中处于空闲状态的组件，使其进入节能状态。但将系统某一组件从关闭到唤醒会有一定的时间延迟，并且在此过程中还会产生相应的能量消耗（图 3.34）。

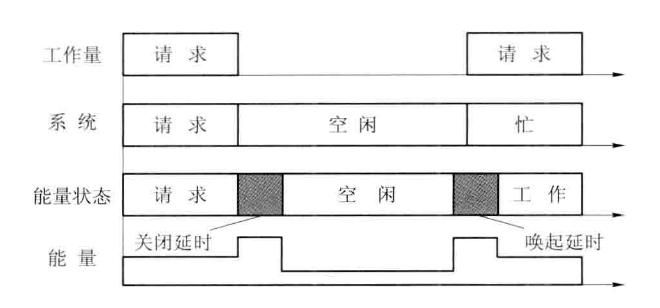


图 3.34 系统组件由开启到关闭时的能量变化示意图

所以，只有当用电设备在关闭时所节省的能量大于或等于因状态转换而额外消耗的能量时（式（3.17）），才可以对该组件断电，否则不宜转换设备的供电状况。

$$(P_{\mathrm{busy}}-P_{\mathrm{idle}})\cdot t_{\mathrm{idle}}\geqslant E_{\mathrm{c}}+E_{\mathrm{o}} \tag{3.17}$$

式中，P_{busy}与P_{idle}分别为系统组件处于工作和空闲状态时的能耗；t_{idle}为系统组件的空闲时间；E_{c}为系统组件由空闲状态到断电关闭时的能量消耗；E_{o}为系统组件由关闭到唤醒时的能量消耗。

由于对大多数真实系统而言，即将输入的信号往往是难以确定的，所以动态电源管理的决策通常建立在对未来空闲时间的不确定进行预知的基础之上。这种预知存在着两种情况：一为预知不足，即预知空闲时间比实际空闲时间短；二为预知过度，即预知空闲时间比实际空闲时间长。预测空闲时间不足将不能达到节能的效果，而预知过度又将可能造成能量的浪费。在此情况下，可考虑采用固定超时算法来妥善解决上述问题。固定超时算法是一种最普遍的电源管理预知法，它是用过去的空闲时间作为观察样本对象来预知当前空闲时段的总持续时间。此方法的要点如下：空闲时间开始，计时器开始计时，超过固定超时时间t_{BE}而系统中组件仍处于空闲时，则电源管理系统停止对该系统组件供电，直到接收到外界供电请求，才标志着空闲状态的结束。采用这种方法，系统节能的效果主要取决于t_{BE}的选择，在机器人技术领域，通常可取$t_{\mathrm{BE}}=t_{\mathrm{idle}}$。固定超时法具有简单、实用的特点，而且系统组件可能的空闲时间越长，应用这种算法的效果就越好，系统节能的幅度也就越大。

2. 电源管理模块工作流程设计

由前述分析可知，当某系统组件不具备工作条件时，则处于空闲状态，通过设备的驱动程序自己检测设备的闲置时间来对设定的超时算法进行分析，当达到可以节省能量的阈值时，就关闭该组件，否则电源管理系统不对其进行断电处理，组件将一直处于工作状态，其具体程序流程如图 3.35 所示。

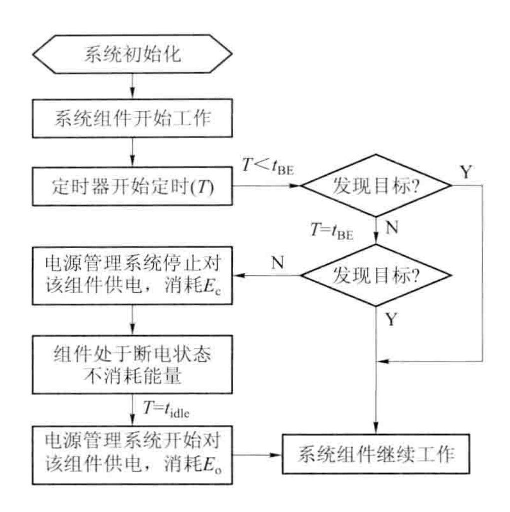


图 3.35　系统电源管理流程图

3.11　中央联合控制系统的仿真实验

3.11.1　Adams 与 Matlab 联合仿真

在进行机电一体化装置机械系统和控制系统的协同设计时，常常是先对两部分进行分别设计，然后再把按设计方案研制的物理样机和控制器组合起来进行整机试验，这种处理方式形式烦琐、周期漫长，不利于提高设计效率。而利用 Adams 软件和 Matlab 及其动态仿真集成环境 Simulink，分别建立机电一体化装置机械系统模型和控制系统模型，然后应用 Adams/Control（控制模块）将 Adams 对应的机械系统模型与 Matlab 对应的控制系统模型连接起来，在控制系统软件环境下进行交互式仿真，就可以在仿真过程中直接从 Adams/View 中观察仿真结果。仿真完成后，还可以对装置的运动学和动力学特性进行分析，并可进一步评估控制系统的稳定性和鲁棒性，从而在节约设计时间和研制费用的前提下，实现高质量、高效率和低成本的设计。

用 Matlab 与 Adams 进行控制系统和机械运动的联合仿真，可以通过调节机电一体化装置的运动控制参数来为后续的样机调试做准备。以数学仿真软件 Matlab 和多体动力学专业仿真软件 Adams 进行的联合仿真具有如下特点：

① Matlab 适于控制系统建模，其传递函数间的关系十分明确，模块化的结构使得模型修改极为便捷，且便于施加于控制系统。

② Adams 模型直观，绝大部分参数间的传递函数关系隐藏在机械结构内部，模型精确度高，且可视化效果好。

③ 把复杂的控制加到 Adams 模型上，能够仿真整个组合系统，发现问题时可以从

机械系统和控制系统相协调的角度来解决。

④ 直接从 Adams 模型中生成机械系统仿真模型，无须推导、列写复杂的方程描述机械系统，因而大大简化了建模过程。

利用 Adams/Control 控制系统与 Matlab/Simulink 实现联合仿真的设计流程如图 3.36 所示，主要经过以下 4 个步骤。

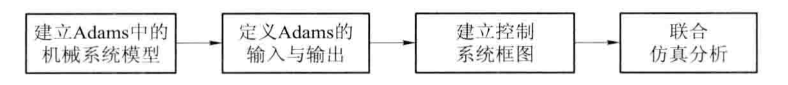


图 3.36 采用 Adams 和 Matlab 联合仿真基本流程图

1. 建立 Adams 中的机械系统模型

简单模型可以利用 Adams 软件直接建模，复杂模型则可以借助一些 CAD 软件（如 UG、CATIA、PRO/E 等）建模，然后将最终模型导入 Adams 环境中，最后给该模型施加约束和作用力。

2. 定义 Adams 的输入和输出

Adams 的输入、输出是与采用 Matlab 设计的控制系统进行数据传递的接口，Adams 的输出变量是控制系统的输入变量，输入变量是返回到 Adams 中的变量，从而构成了一个从 Adams/Control 到 Matlab/ Simulink 的闭环系统。其中，所有输入需设置为变量，输出则可以设置为测量值。

3. 建立控制系统框图

利用 Matlab/Simulink 提供的模块库或自行编写的 S 函数建立控制系统模型，设置各模块参数与所需测量量，并把在 Adams/View 中建立的虚拟样机系统模型模块导入 Simulink 中，设置为 Adams plant 模块。

4. 联合仿真分析

在 Simulink 环境下设置仿真参数，对虚拟样机模型进行联合仿真，并根据需要随时修改机械系统或控制系统，直到获得满意效果为止。

3.11.2 控制系统仿真模型的建立与实现

为了给工程原理样机的验证提供可靠依据，对智能作战机器人进行了联合仿真分析，过程如图 3.37 所示。首先，采用 Adams 建立机械模型，将电动机扭矩作为机械模型部分的输入；其次，将运动云台上发射筒的转角作为机械模型部分的输出，得出控制模型所需的机械部分控制模块；最后，在 Matlab 中构造相应的电气部分的控制模块，它以机械模型部分输出的转角作为输入的反馈量，并向机械模型部分输出电动机扭矩。机械部分的控制模块和电气部分的控制模块共同构成 Adams-Matlab 联合仿真用机电一体化模型。在仿真过程中，信号经由电气部分的控制模块从 Adams-Matlab 软件接口传入 Adams 机械模型中，并将机械模型的仿真结果传入 Matlab 控制模块中；Matlab 控

制模型根据传入机械模型的仿真结果确定系统的反馈和输出，并向机械模型部分提供电动机扭矩，从而同时完成机械系统和控制系统的联合仿真。

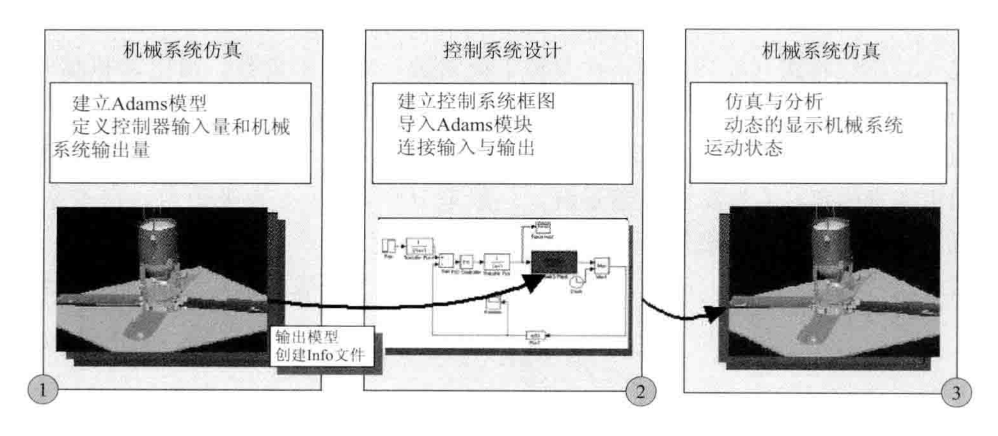
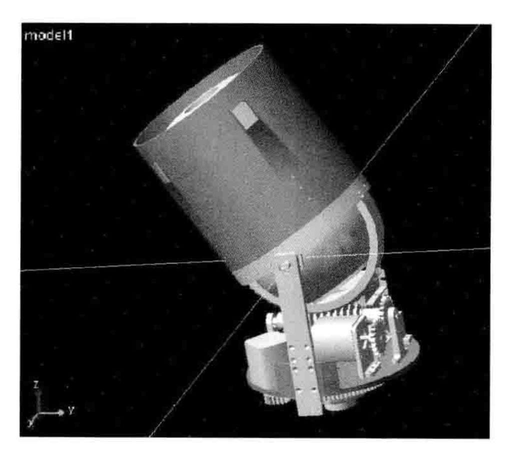


图 3.37　智能作战机器人联合仿真过程示意图

由于在 Adams 中很难精确建模，故选择具有很强实体造型和虚拟装配能力的 Pro/E 软件来建模，并通过接口设置将模型保存为 Parasolid 格式，再导入 Adams 中。图 3.38 所示为导入 Adams 中的智能作战机器人运动云台和机器人发射筒及战斗部的三维模型，模型建立后，对其定义材料、质量、约束并施加载荷，所加约束有固定约束和旋转约束副两种。



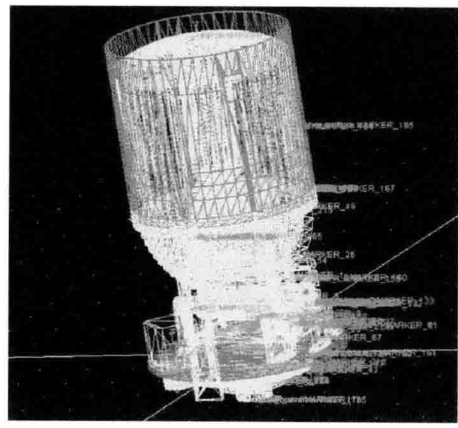


图 3.38　智能作战机器人运动云台、机器人发射筒及战斗部造型图

在控制系统的设计中，由于智能作战机器人运动云台采用两相混合式步进电动机驱动，其在恒流源条件下的传递函数为：

$$G(s)=\frac{w^2}{s^2+\frac{d}{j}s+w^2} \tag{3.18}$$

其中，w 的定义式为：

$$w=\sqrt{\frac{2p^2\phi_m I_0\cos(p\lambda/2)}{j}} \tag{3.19}$$

式（3.18）和式（3.19）中，p 为转子极对数，即转子齿数，由电动机型号可知 $p=50$；j 为转动部分转动惯量，即转化到电动机轴上的转动惯量总和；I_0 为 A、B 电动机两相流过的恒定电流；ϕ_m 为永磁体交链的磁通，$\phi_m=I_0L$；L 为电动机相电感，由电动机本身确定；d 为黏性摩擦系数，一般取 $d=0.05$；λ 为极距角，在本系统中，电动机为恒流源运行，极距角与一相励磁相同，故 $\lambda=0$。

结合式（3.18）和式（3.19），根据所选电动机型号查表，可知电动机传递函数为：

$$G_1(s)=\frac{27\ 187.5}{s^2+31.25s+27\ 187.5} \tag{3.20}$$

在建立控制系统的运行框图时，根据传动模型、传动比和齿隙误差，系统采用单位反馈，将运动云台承受的力矩折算到从动齿轮后，再通过减速机构折算得到电动机输出轴的负载力矩，步进电动机的输出力矩采用理想的步进电动机模型计算，通过 Matlab 子程序调用方式，将 Adams 中生成的动力学模型结合到 Simulink 所构建的系统中，Simulink 即可将计算所得到的控制流通过 Adams/Plant 施加到 Adams 环境中的智能作战机器人指定位置上（各转动关节），同时，各位置的运动状态也通过 Adams/Plant 反馈到 Simulink 环境中。在 Matlab 中选择 .m 所在文件夹为工作目录，运行 Adams_sys，则生成一个 Adams_sys_.mdl 文件，通过其中的 Adams_sub 作为 Adams 与 Matlab 的接口，建立一个如图 3.39 所示的电动机与运动云台耦合的仿真模型，图中 V 表示电动机电压，K_e 和 K_t 分别表示步进电动机电磁转矩系数和感生电动势系数。

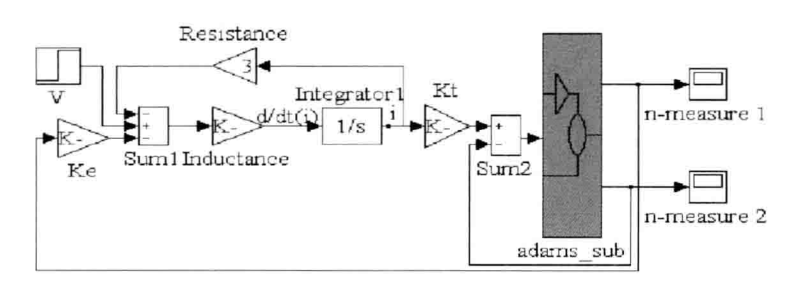


图 3.39 Matlab 和 Adams 复合控制器仿真结构图

运动云台的 Adams 子模型如图 3.40 所示。图中 torque_1 和 torque_2 表示电动机的输出力矩，angluar_velocity 表示电动机输出轴角速度，beam position 表示装载在运动云台上的机器人发射筒顶端的位移变化。

搭建控制系统后，即可在 Matlab 环境中进行联合仿真，通过植入 Adams 模块可进行机械动力学解算，通过控制软件求解器可控制解算，通过状态空间可进行两者之间接

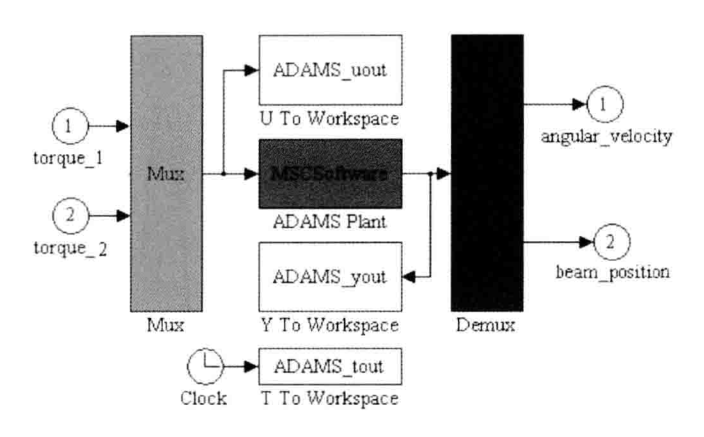


图 3.40　运动云台的 Adams 模型示意图

口变量的连接。仿真运行时，可在 Matlab/Simulink 中观察并输出仿真变量曲线。在仿真结束后，可进入 Adams 的后处理（Postprocess）模块并观看仿真动画，通过动画可以清楚地看到智能作战机器人各关节转动平稳，响应迅速。另外，后处理模块还可以计算 maker 点和各关节运动副上的位移与速度等。

通过仿真，得到如图 3.41 所示的机器人发射筒顶端的位移变化曲线，由该图可以看出，智能作战机器人运动云台很好地满足了预期的扫描规划要求。图 3.42 所示为运动云台驱动电动机的角速度变化曲线，其变化情况充分说明了智能作战机器人运动规划的合理性和控制算法的有效性。图 3.43 为运动云台驱动电动机的转矩变化曲线，根据最大转矩可以确定电动机和减速器的扭转转矩，而有效转矩对应于电动机的平均转矩。于是根据角速度的变化情况，可就以确定减速器等传动部件的传动比。综合考虑速度与力矩，就可以为选择合适的电动机以及相应的传动部件提供帮助。

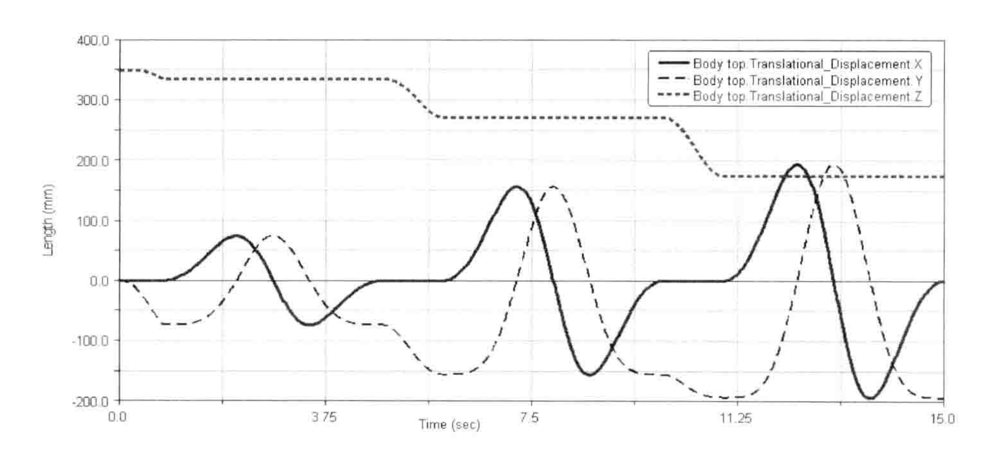


图 3.41　机器人发射筒顶端位移曲线

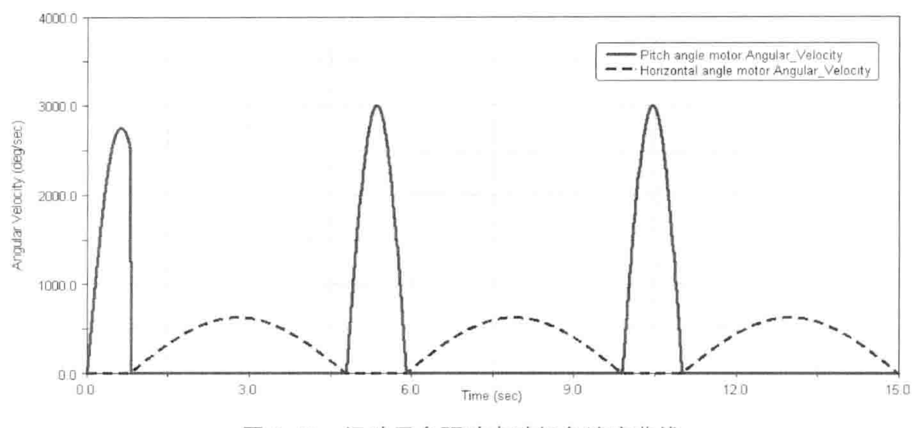


图 3.42 运动云台驱动电动机角速度曲线

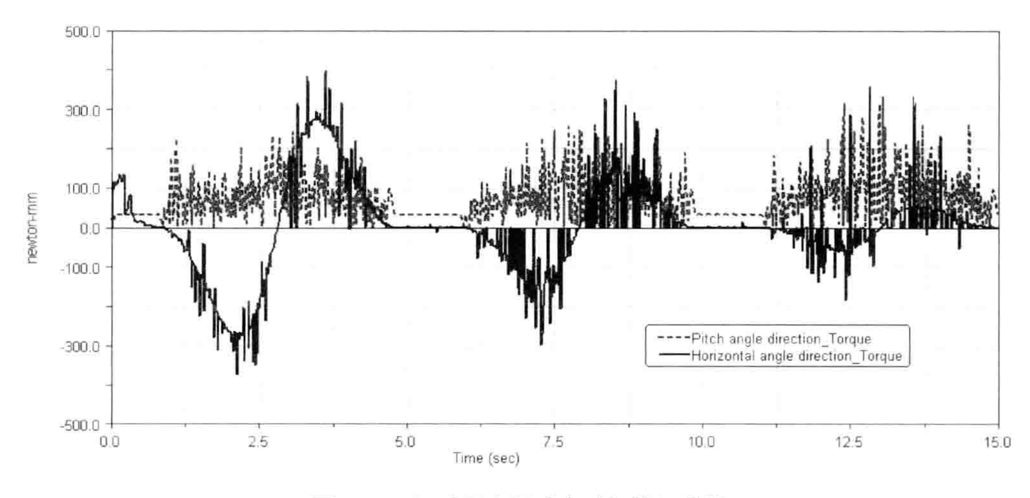


图 3.43 运动云台驱动电动机转矩曲线

总之，通过联合仿真实验，不仅验证了智能作战机器人控制系统具有很好的稳定性和实时性，而且也为智能作战机器人执行机构的选型提供了依据。这也说明，采用 Adams 和 Matlab 交互仿真对智能作战机器人中央联合控制系统进行研究是有效和可行的。

3.12 基于 Multisim 的电控点火仿真实验

3.12.1 Multisim 电路仿真软件的应用

Multisim 仿真软件是一个专门用于电子线路仿真和设计的 EDA 工具软件，它拥有非常巨大的元件数据库，能够提供原理图输入接口、全部的数模 Spice 仿真、VHDL/Verilog 设计接口与仿真、FPGA/CPLD 综合、RF 设计能力和后处理功能，还可以进行从原理图到 PCB 布线工具包的无缝隙数据传输，具有界面形象直观、操作方便、分

析功能强大、易学易用等突出优点，是其他电路设计软件所不能比拟的。该软件是加拿大交互图像技术有限公司在20世纪80年代末推出的EDA软件，其仿真功能十分强大，可近乎100%地仿真出真实电路的结果，而且它提供了各种各样的电子工具，如万用表、示波器、信号发生器和逻辑分析仪等，是个极好的EDA工具。

在Multisim中进行仿真，首先要设计仿真电路图，具体操作步骤如下：

① 调用元器件：调用元器件是电路创建中最基本的操作之一，其常用操作有选择元器件、移动元器件、旋转元器件和设置元器件参数等。

② 电路图设置：Options菜单下的命令用于设置与电路显示方式相关的选项，可以设置是否显示电路参数、电路颜色，是否自动连线，可以改变字体、字形、字号等。

③ 连接导线：将各个元器件的端点用导线连接起来，会自动选择合适的导线走向，不会与其他元器件出现交叉。根据需要可以将导线设置成不同的颜色。

④ 仪器仪表的使用：包括使用万用表、电流表、电压表、函数信号发生器和多通道示波器等对电压值、电流值、电阻值、分贝值、信号的幅值、占空比和偏移量等进行测试和调整。

在完成仿真电路图的设计工作后，即可对电路进行仿真分析，所用方法主要包括电路分析法和仿真实验法。在电路分析法中，Multisim提供了直流工作点分析、交流频率分析、瞬态分析、失真分析、参数扫描分析和温度扫描分析等十多种电路分析功能；在仿真实验法中，首先设置电路中电子器件和仪器仪表的参数，然后运行电路，单击主窗口的启动开关O/I按钮，电路开始仿真，若要使实验暂停，可单击主窗口的暂停键。最后，观测并记录实验结果。

3.12.2 电控点火电路的仿真结果与分析

智能作战机器人电控点火电路是根据电容充放电的基本原理和安全可靠性而设计的，对其综合性能的验证需要从两个方面进行：一是电路产生的电流能不能达到SCB发生作用时间的大小；二是电路的各项保护性措施能否逐一发挥应有的作用。如果直接做实验，一方面风险过高，另一方面当电路某一处出现问题时，也不便于排查和修改，因此，对设计的电控点火电路进行仿真是很有意义的。

通过对该点火系统储能电容充放电过程、抗干扰和防误点火以及整体点火控制效果等方面的仿真模拟，能够为电路的理论分析提供依据，在仿真中可以随时中断仿真并修改元器件参数以达到最佳的电路工作状态。

1. 储能电容充放电过程的仿真分析

在储能电容的充电回路中，选取充电电容为500 μF，泄放电阻为10 MΩ，点火电源电压为27 V，在控制器发出充电信号后，利用示波器观察系统充电时的工作情况（图3.44）。在图3.44中，1通道是电容充电时电容两端的电压变化情况，2通道是点火电源充电控制信号。从图中可以看出，充电控制信号为低电平时，电容电压一直为

零；当充电控制信号由低电平向高电平跳变后，光电耦合器控制充电回路导通，电容开始充电，充满后一直维持 27 V，等待放电，而充电控制信号则回到低电平。

同样，在储能电容的放电回路中，选取放电电容为 500 μF，SCB 采用 1 Ω 电阻，在控制器发出点火信号后，该电路开始瞬间放电，利用示波器观察系统的工作情况，其结果如图 3.45 所示。在图 3.45 中，1 通道是电容放电时电容两端的电压变化情况，2 通道是点火控制触发脉冲。从图 3.45 可以看出，放电前电容两端电压一直保持在 27 V，点火触发脉冲到来后，通过 IGBT 接通点火电路，即将 SCB 与放电电容接通，电容开始放电，电压逐渐下降，放电时间约为 3 ms，在这段时间内，SCB 启动并完成点火。

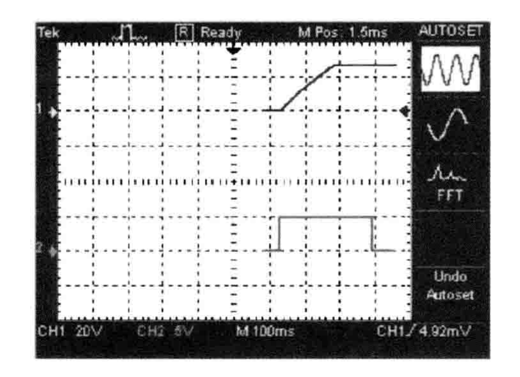


图 3.44 储能电容充电过程的仿真波形

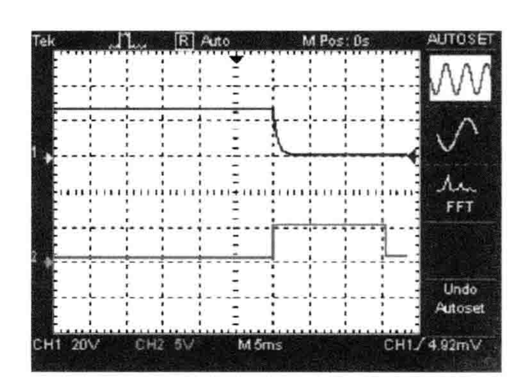


图 3.45 储能电容放电过程的仿真波形

2. 电控点火电路安全性的仿真分析

针对系统上电时产生上电干扰信号导致误发火的问题，电路中采用了上电延时与门对信号进行隔离修正。在抗上电干扰的修正电路中，分别选取 10 μF 的电容和 10 kΩ 的电阻形成 *RC* 充电电路，在系统上电时，该 *RC* 回路产生的短暂延时能对瞬间干扰信号进行屏蔽，通过仿真，由示波器得到的工作情况如图 3.46 所示。在图 3.46 中，1 通道为电源上电干扰信号，2 通道为 *RC* 延迟信号，3 通道为与门校正输出信号。从图 3.46 还可以看出，系统上电时有一个短暂的上电干扰，而此时与门的另一端接通的 *RC* 延迟信号还处在充电阶段，为低电平，从而与门输出低电平，这样，与门校正可以屏蔽电源的上电干扰信号；当 *RC* 充电完成后，与门输出则与点火控制信号实现同步。

由于在系统工作过程中，其他子系统的控制工作也会产生误点火干扰信号，为此，选取了 ACPL—5600L 型 3.3 V 光电耦合器来对点火信号进行隔离滤波，其控制端负载为 400 Ω，受控端负载为 1 kΩ。当电路中给予干扰信号时，利用示波器观察系统防误点火的隔离效果，其情况如图 3.47 所示。在图 3.47 中，1 通道为 DSP 给出的点火控制管脚信号，2 通道为经过光电耦合器校正后的点火控制信号。由图可以看出，当 DSP 给出的管脚信号低于 3 V 时，光耦无信号输出，信号被有效屏蔽；当 DSP 管脚给出 3.3 V 以上的高电平时，光耦输出为 3.3 V 高电平的控制信号，成功地对干扰信号进行了隔离。

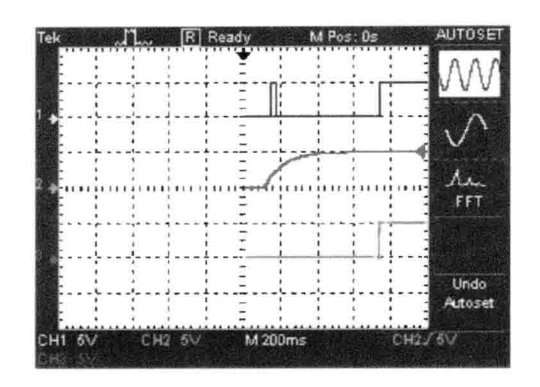



图 3.46　防上电干扰过程的仿真波形

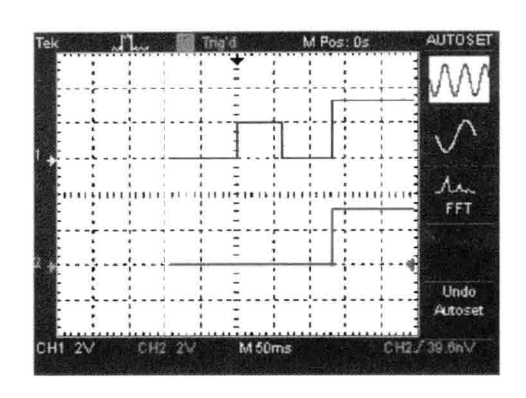


图 3.47　隔离误点火信号过程的仿真波形

3. 单稳态触发器的 *RC* 调节对点火时间影响的仿真分析

在单稳态触发器 SN74121N 的连接回路中，为了测试电阻阻值对点火脉宽的影响程度，首先固定电容值为 10 μF 不变，然后分别将电阻值设定为 200 kΩ 和 50 kΩ，通过控制单稳态触发器输出脉冲，由示波器观察到的输出脉冲波形如图 3.48 所示。在图 3.48 中，1 通道为 R=50 kΩ、C=10 μF 时单稳态触发器输出的脉冲波形，2 通道为 R=200 kΩ、C=10 μF 时单稳态触发器输出的脉冲波形。从图中可以看出，在电容一定时，由于电阻阻值的不同，单稳态触发器输出的脉冲波形分别为 200 ms 和 800 ms。因此，电阻阻值对输出的点火脉冲宽度影响很大，阻值越大，则波形越宽，即点火时间越长。

同样，为了测试电容 C 的取值对点火脉宽的影响程度，首先固定电阻值为 200 kΩ 不变，然后分别将电容值设定为 10 μF 和 1 μF，通过控制单稳态触发器输出脉冲，由示波器观察到的输出脉冲波形如图 3.49 所示。在图 3.49 中，1 通道为 C=1 μF、R=200 kΩ 时单稳态触发器输出的脉冲波形，2 通道为 C=10 μF、R=200 kΩ 时单稳态触发器输出的脉冲波形。从图中可以看出，在电阻阻值一定时，由于电容大小的不同，单稳态触发器输出的脉冲波形分别为 180 ms 和 800 ms。这表明电容大小对输出的点火脉冲宽度影响很大，电容越大，则波形越宽，点火时间也就越长。

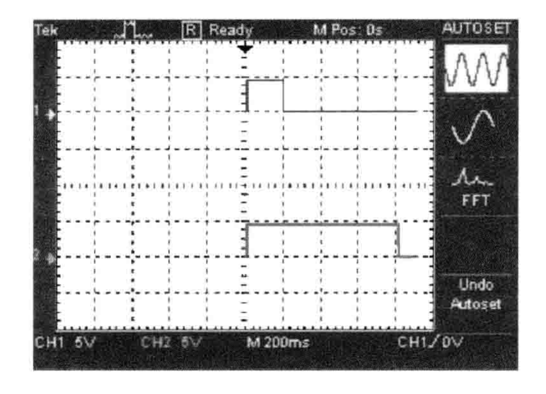


图 3.48　电阻值对点火脉宽影响的仿真波形

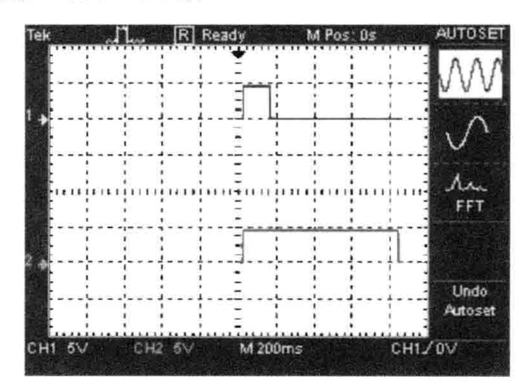


图 3.49　电容值对点火脉宽影响的仿真波形

4. 点火电路整体控制效果的仿真分析

根据点火电路控制流程的要求，并结合本电路的具体特点，选取 SCB 桥体阻值为 1 Ω、点火电源为 27 V、充放电电容为 500 μF。点火过程由 DSP 发出的三路信号进行控制，一路控制点火前的静电泄放开关的断开，另一路控制储电电容的充电，第三路发出点火控制信号，经光电耦合隔离、电平转换开关后传到单稳态触发器，控制其输出点火脉冲，该脉冲触发 IGBT 导通和关断，从而最终控制 SCB 的发火。通过对电路的整体工作过程进行仿真，由示波器观察到的输出脉冲波形如图 3.50 所示。在图 3.50 中，1 通道为点火电容电压的变化情况，2 通道为防静电控制信号，3 通道为点火电源上电控制信号，4 通道为点火控制信号。仿真开始时表示系统检测到了目标，准备点火发射。从图 3.50 中可以看出，系统首先控制静电泄放开关解除防静电保险机构，然后由 DSP 发出点火电源上电信号，电容器开始充电，待充电完成，该信号归零。一段延迟时间过后，系统给出点火信号，通过开关转换与隔离放大，控制 IGBT 导通，使 SCB 所在回路接通，电容器开始放电，电压在很短时间内下降到零，产生很大的峰值电流，使 SCB 发火，从而实现点火控制任务。

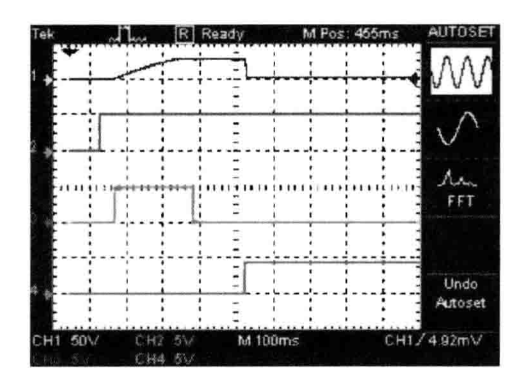


图 3.50　点火电路整体控制效果的仿真波形

3.13　基于 CCS V3.3 的双 DSP 通信测试实验

3.13.1　通信程序开发环境代码调试器简介

代码调试器（Code Composer Studio）是一套用于开发和调试嵌入式应用的仿真工具，它能够提供强健、成熟的核心功能与简便易用的配置和图形可视化工具，使系统设计更加快捷、简便。同时，它还包含适用于每个 TI 器件系列的编译器、源码编辑器、项目构建环境、调试器、描述器、仿真器以及其他多种功能。CCS IDE 提供了单个用户界面，可以很好地完成开发流程的每个步骤，借助于这款高效的仿真工具，用户能够利用熟悉的工具和界面快速得到所需的结果。

利用 CCS 集成开发环境，用户们可以在一个开发环境下完成工程定义、程序编辑、编译链接、程序调试和数据分析等工作。在 CCS 集成开发环境中，很多功能是所有 DSP 平台都需要而且常用的，这些功能是调试一个 DSP 系统的基本环境基础。要完成一个能在 DSP 芯片中正常运行的代码，这个代码就应该是一个工程应用型代码，它不仅是一段 DSP 算法程序，还应该是一个工程的 .prj 项目文件，其中包括创建的独立应

用程序或库文件的所有信息，这些信息主要包括源代码和目标库的文件名称、代码产生工具配置选项和相关的头文件。工程配置主要确定工程项目开发的不同阶段，包括 Debug 和 Release 两个阶段。Debug 用于调试程序，Release 用于输出工程完成后的最终结果，当然也可以根据需要确定。

对于源程序的调试，CCS 环境下支持全速运行（Runing）和单步运行（Step Run）等命令，统称为程序运行控制。在调试程序时，如果停止程序运行，则可以使用源代码或汇编程序单步运行。源代码单步运行是指每次运行源代码，编辑窗口显示一条源程序；汇编程序单步运行是指每次运行一条汇编程序，可以通过 View→Mixed Sourse/ASM 命令同时显示源代码和对应的汇编程序。

CCS V3.3 是基于 Eclipse 开放源码软件框架的，该 Eclipse 软件框架有多种不同的应用，能够为构建软件开发环境提供出色的软件框架，并且正成为众多嵌入式软件供应商采用的标准框架。CCS 将 Eclipse 软件框架的优点和德州仪器（TI）先进的嵌入式调试功能相结合，在嵌入式开发领域提供了一个引人注目、功能丰富的开发环境。

3.13.2　双 DSP 通信的仿真设计与实现

1. 数据通信验证实验

从智能作战机器人的工作机理来看，中央联合控制系统中主控芯片 F28015 的控制信号来源于探测子系统的图像处理器 DM6437 的数据输出，为了保障主控芯片 F28015 的有效控制，发现目标时应该发送给 F28015 两个角度，即被测目标相对于以智能作战机器人为坐标原点的俯仰角和水平角。因此，对于两块芯片来说，DM6437 发送给 F28015 的数据应为两个，只有顺利完成这两款芯片间有效数据的通信，才能保证整个系统工作的有效性。

在实验中，考虑到 DM6437 芯片配合其软件开发系统 CCS V3.3 能够支持实时输出显示功能，因此，为简化设计，并便于观察实验结果，双 DSP 的 I^2C 通信测试过程为：先让 DM6437 发送 2 个角度数据到 I^2C 总线上，同时输出这两个数据对应的相关信息，并监察是否有数据返回。对于 F28015 来说，利用中断响应程序接收 DM6437 发送的数据，如果接收到了 DM6437 通过 I^2C 总线传来的数据，就对数据进行处理（对俯仰角度加 10°以调整到合适的发射角），然后再通过 I^2C 总线将处理之后的数据返回给 DM6437。DM6437 接收返回的数据，并根据收到数据情况输出相关信息。通过实时观察输出信息，就可以清楚地了解 I^2C 通信的实际效果。

具体实验步骤如下：

① 将 ICETEK—XDS560 仿真器的插头插到 ICETEK—DM6437—B 的 JTAG 插口 J1 上；将 ICETEK—XDS510 仿真器的插头插到 ICETEK—DM6437—B 的 JTAG 插口 J2 上。接通电源，将 DC＋5V3A 电源连接到板卡电源插座 J14 上。

② 设置 CCS 启动参数：开始→Texas Instruments→Code Composer Studio 3.3→

Setup Code Composer Studio v3.3，单击 System Configuration 栏中的“Remove All”按钮，清空 My System，单击选择中间窗口栏下边的 Custom Boards 卡片，选择 DM6437 XDS560 Emulator 和 F28015 XDS510 Emulator，单击“Add”按钮，将其添加到 My System 列表下。

③ 启动 CCS，选中列表中的 F28015 XDS510 Emulator 项，单击“右键”，选中 Connect Target，完成对硬件的连接。对 DM6437 XDS560 Emulator 执行同样的操作。

④ 分别打开编好的 F28015 和 DM6437 工程文件，编译下载到芯片的 RAM 中。

⑤ 先后运行 DM6437 和 F28015 的程序，观察 Stdout 窗口的运行结果。

通过 Stdout 窗口观察到的实验输出结果如图 3.51 所示。

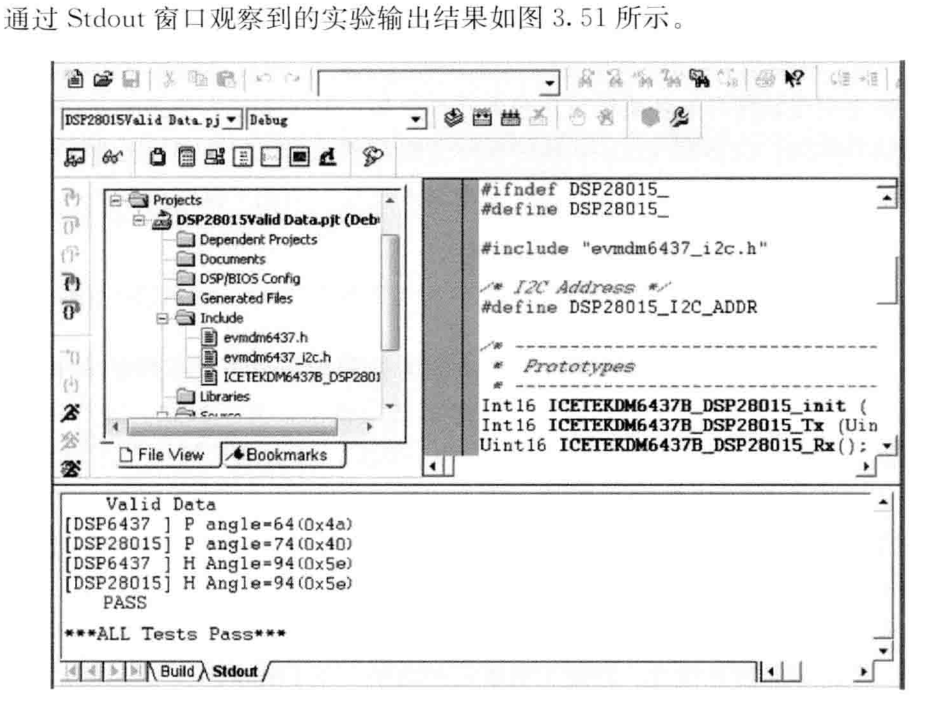


图 3.51 I^2C 通信验证程序的输出结果

从图 3.51 中可以看出，DM6437 发送数据给 F28015 以后，经过 F28015 接收并处理，顺利发送返回给了 DM6437，在 Stdout 栏中以打印形式显示结果，表明数据成功通过 I^2C 总线发送并接收，系统顺利实现了双 DSP 芯片间的通信测试，符合智能作战机器人实际工作时发送数据的要求，达到了预期效果。

2. 通信可靠性与实时性测试实验

智能作战机器人要实现对攻击目标的准确打击，就必须保证通信过程中收到的数据准确可靠，同时还要保证数据传输的实时性。本实验的目的是通过测试 DM6437 向 F28015 发送数据过程中，数据接收的准确性和实时性，了解数据通信的质量和效率。

实验原理为：DM6437 向 F28015 发送 10 000 个数据，同时 F28015 在收到每一个

数据后都将收到的数据回发给 DM6437。DM6437 每次收到反馈数据后，进行比对，如果与发送数据相同，则“发送正确”的计数变量加一；如果与发送数据比对后不符，则“发送错误”的计数变量加一。然后，通过计算发送过程中的数据正确数和错误数，即可得出发送数据的正确率。实验步骤同上节，运行测试程序后，通过 Stdout 窗口显示的输出结果，如图 3.52 所示。

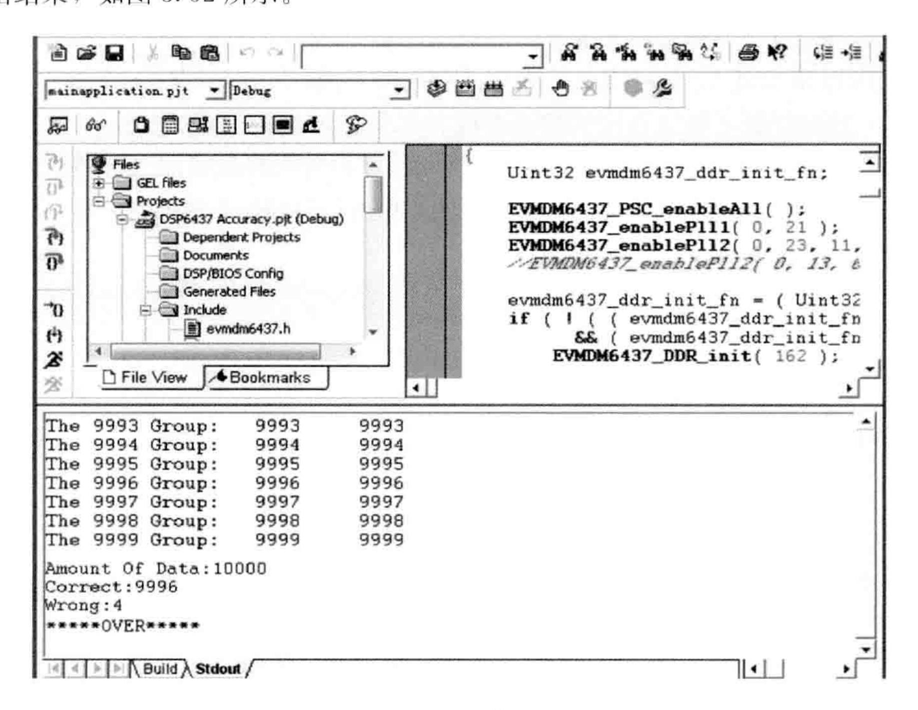


图 3.52　I^2C 通信可靠性测试的输出结果

由实验结果可知，DM6437 和 F28015 之间进行数据通信的正确数为 9 996，错误数为 4，计算得知正确率为 99.96%，达到了通信可靠性的基本需求，符合整个系统对数据通信误码率的相关要求。

通过验证和分析，认定导致数据通信产生错误的主要原因有以下几点：

① 在实际数据传输过程中，由于空间中存在各种复杂的电磁信号，这些电磁信号强弱不同、频率不一，因而通过电磁波辐射窜入系统产生干扰，造成数据传输总线上出现电平的改变，导致数据在总线传输过程中出现错误。

② DM6437 和 F28015 在向各自 I^2C 模块的数据传输寄存器写数据和读数据时，由于工作环境温度过高等造成电源供电系统出现过压、浪涌和尖峰等不利状况，导致数据写入和读取错误，从而造成数据传输出现错误。

③ DM6437 和 F28015 在执行程序过程中由于存在取指令、执行指令错误等问题，进而造成数据在处理过程中出现谬误，也会导致数据通信错误。

由于智能作战机器人的工作环境十分恶劣，高温、强电磁干扰等会对系统中的数据

通信造成不利的影响。为了使通信能够更加可靠地进行，应提高硬件的抗电磁干扰、耐高温等相关性能，同时优化程序，增强对数据通信错误的纠错能力，以保证通信更加可靠地进行。

对于通信系统来说，实时性是通信性能的一个重要指标。在本设计中，一方面，采用 I^2C 总线通信方式在短距离通信上有很大的优势，其通信时钟频率可达 400 kb/s，具有快速高效的特点，能够迅速完成两块芯片间的数据通信；另一方面，这两块 DSP 芯片都具有执行指令速度快的特点，其中 DM6437 主频为 600 MHz，F28015 主频为 150 MHz，这就保证了发送和接收数据都能在很短的时间内完成。因此，在实际情况下，完成有效数据通信所用的时间很短（毫秒级），而智能作战机器人对两块芯片间数据交换的实时性要求并不十分苛刻，毫秒级的数据通信时间完全能够符合智能作战机器人洞库作战的实际要求。

第4章 智能作战机器人图像采集和目标识别技术

4.1 国内外机器视觉研究的现状及发展趋势

4.1.1 机器视觉概述

在地球上，以人类为首的所有动物，都会感受外界所传来的各种信息，借以掌握外界的状况而采取行动。为了感受信息，人类拥有视觉、听觉、嗅觉、触觉、味觉等5种感觉，也就是所谓的“五感”。虽然人类可以从眼睛、耳朵、鼻子、皮肤、舌头等处获得信息，但是获取信息最多的还是视觉。在借助“五感”获得的信息中，大约有80%来自视觉。长久以来，人类一直梦想着能够制造出具有智能的机器，而智能机器实现的基础就是机器视觉技术。那么什么是机器视觉呢？美国制造工程师协会（Society of Manufacturing Engineers，SME）机器视觉分会和美国机器人工业协会（Robotic Industries Association，RIA）自动化视觉分会为机器视觉作了如下定义：“机器视觉是通过光学的装置和非接触的传感器自动地接收和处理一个真实物体的图像，以获得所需信息或用于控制机器人运动的装置。”通俗地说，机器视觉就是用机器模拟生物宏观视觉功能，代替人眼来做测量和判断。首先，通过图像传感器将被摄取的目标转化成为图像信号，传送给专用的图像处理系统，根据像素分布、亮度和颜色等信息，转变成数字化信号；随后，图像处理系统对这些信号进行各种运算来抽取目标的特征，如面积、长度、数量、位置等；最后，根据预设的容许度和其他条件输出结果，如尺寸、角度、偏移量、个数、合格/不合格、有无等。从广义角度来看，凡是通过光学装置获取真实物体的信息以及对相关信息的处理与执行都是机器视觉，这就包括了可见视觉以及非可见视觉，甚至包括人类视觉不能直接观察到的、物体内部信息的获取与处理等。

科学家们通过研究发现，人脑中许多组织都参与了视觉信息的处理过程，因而能够轻易地处理视觉方面的问题。但是视觉认知作为一个复杂奥妙的过程，人类对其还知之甚少，因而制造出具有视觉功能的智能机器的梦想也一直难以实现。随着视觉传感技术、信息处理技术和计算机技术等的迅猛发展，具有视觉功能的智能机器开始被人类制造出来，并逐渐形成了机器视觉的学科和产业。对于智能机器而言，赋予其人类视觉功能是极其重要的，于是人们把计算机的快速性、可靠性、结果的可重复性与人类视觉的高度智能化和抽象化能力结合起来，形成一门新的学科——机器视觉。

机器视觉的应用领域极为宽广，是实现仪器设备精密控制、智能化、自动化的有力武器，其优点包括：

① 可实现非接触测量。由于机器视觉系统采用非接触测量方式，对观测者和被观测者都不会产生任何损伤，能显著提高系统的可靠性，增加仪器设备的作用空间。

② 具有较宽的光谱响应范围。由于人类的视觉感知能力只限于电磁波谱的可视波段，而成像器件的感知范围则可覆盖几乎全部电磁波谱，从γ射线到无线电波。成像器件可以对非人类习惯的那些图像源进行加工，这些图像源包括超声波、电子显微镜及计算机产生的图像，从而扩展了人类的视觉范围。

③ 能够长时间工作。由于体力和精力所限，人类难以长时间、高质量地对同一对象进行观察。机器视觉系统则不然，它可以长时间地执行观测、分析与识别任务，并可应用于恶劣的工作环境。

此外，机器视觉系统既可引导长距离的运动，又可指导细微的操作，彻底改变了机器人对操作对象及工作环境必须精确建模的要求。依靠视觉信息的反馈，机器人可实现在动态、不确定场合中的可靠操作。因此，机器视觉控制技术在诸如工业机器人、服务机器人、医用机器人、太空探险机器人、军用机器人等项目中得到了具体研究与实际应用，正是由于视觉控制技术相比传统传感器实现的机器人控制技术体现出了更高的灵活性，以及对机器人标定误差所具有的强鲁棒性，使得机器视觉控制技术成为机器人研究领域中的热点之一。机器视觉控制理论与技术的研究，对于拓展机器人应用范围，提高机器人智能化、自主化水平，具有十分重要的意义。

中国机械工业联合会执行副会长朱森第教授曾说："机器视觉将是推动中国制造业发展的关键技术之一。"

当前，机器视觉技术在不同领域都得到了广泛的应用。从工业到民用，从军事到医疗，不论高端低端，我们都能看到视觉技术带来的好处与便捷。今天，机器视觉的应用范围不但包括纺织与服装、食品与粮食、特种检验、包装、机械制造、邮政分拣和海关与口岸等领域，还包括集成电路检测、航空航天、军事国防、消防和公路交通等领域。但我们也要清醒地看到，机器视觉的研究、发展和应用还远没有达到成熟的程度。机器视觉从诞生到今天只有短短的三十多年时间，在机器视觉系统中承担"大脑"作用的图像分析处理、图像理解、模式识别的理论和技术基础还十分薄弱，甚至连机器视觉的图像获取系统也还存在许多局限，比如高速图像采集困难、器件价格高昂、图像分辨率和灵敏度不高、敏感元件制造困难、视觉系统体积较大、自适应图像难以获取，等等，都是影响当前机器视觉技术发展的不利因素。

机器视觉作为一种应用系统，自诞生以来始终随着工业自动化的发展而不断发展和逐渐完善。2007年，全球机器视觉市场总量约为90亿美元，近年还在以每年10.9%左右的速度迅速增长，专家们估计，到2013年，全球机器视觉市场总量将超过180亿美元。机器视觉的应用研究也已拓展到几乎每个可能的工业领域。

4.1.2　国外机器视觉研究的现状及发展趋势

目前，国外机器视觉技术发展最成熟、使用最普及的地区是欧美和日本，机器视觉重点应用在半导体及电子行业，其中 40%～50%都集中在半导体行业。具体如 PCB 印刷电路、SMT 表面贴装、电子生产加工设备、质量检测等。

在机器视觉的应用实例中，美国火星探测机器人“凤凰”号应该代表了国外机器视觉技术的最高水平。该探测机器人配备着“表面立体成像仪”（Surface Stereo Imager，SSI，见图 4.1）和“机械手臂相机”（Robotic Arm Camera，RAC，见图 4.2）两种光学仪器。

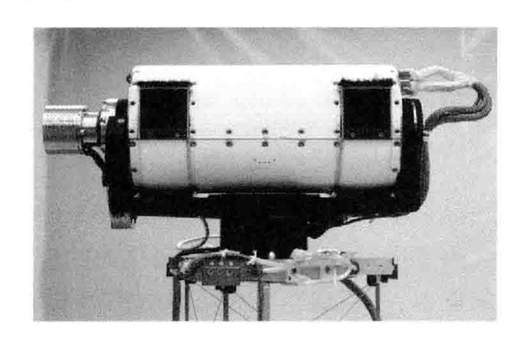


图 4.1　表面立体成像仪

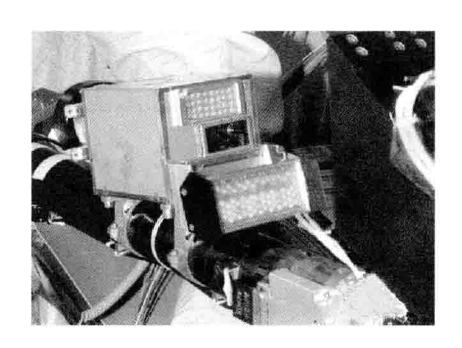


图 4.2　机械手臂相机

“表面立体成像仪”是“凤凰”号火星探测机器人最主要的图片拍摄装置，该装置中放置着两个能拍出立体感的摄像头，每个摄像头含有单色素传感器，可以拍摄 1 024×1 024（1 兆像素）的图像。“表面立体成像仪”可以自由旋转 360°，能够轻松拍摄各种角度的天空与地面景象。科学家们表示，“表面立体成像仪”中的立体成像技术不仅能拍摄出漂亮的地表实况图像，还能在扫描地形的过程中自动分析、生成精确的三维地形图。通过“表面立体成像仪”所发回来的三维地形图，科学家们可以轻而易举地根据地形特点，选择合适的研究切入点，利用机器装备完成各种研究样本的采掘工作。为了得到火星表面的全景图或其他更高要求的图像，专家们还可将“表面立体成像仪”所传回的多角度拍摄的多幅照片进行镶嵌式合成，以获得清晰精确的图像效果。

“机械手臂相机”与“表面立体成像仪”相比，其上传感器所捕捉到的图像的像素水平更低，仅为 512×256 或 1/10 兆像素。但“机械手臂相机”能进入“表面立体成像仪”所不能到达的许多地方，它对“表面立体成像仪”的拍摄能起到很好的补充作用。

“凤凰”号火星探测机器人上所配备的“表面立体成像仪”技术水平非常高（其拍摄的图片可见图 4.3）。作为双目视觉系统，该成像仪不但能够测量周围物体到机器人的距离，还能够自动扫描生成周围环境精确的三维立体地形图。同时，它还可以进行周围环境图像的全景拼接。双目测距、全景拼接、三维地图的建立都是机器视觉领域的核心技术，而美国在这些方面已经处于领先位置。

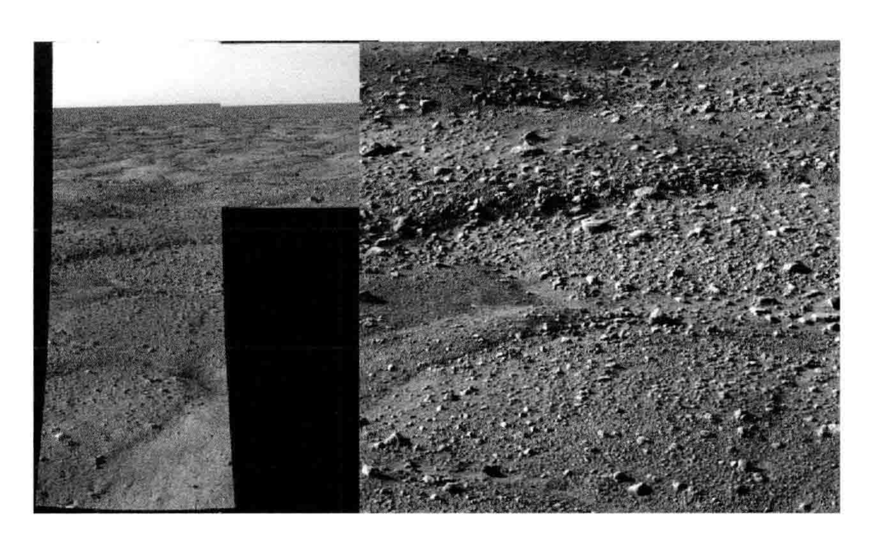


图 4.3 “凤凰”号“表面立体成像仪”拍摄的图片

美国喷气推进实验室（Jet Propulsion Laboratory，JPL）研制的新一代 Rocky 7 火星探测机器人“机遇”号（图 4.4）主要用来对火星进行探测，寻找水和生命的迹象，同时也用来测试机器人远距离漫游和采集样本的能力。“机遇”号火星探测机器人装置的传感器包括：三套立体视觉黑白摄像机，布置方式为车前部一套、后部一套、车体桅杆上一套；太阳位置传感器；石英速率陀螺仪；加速计；轮式光学编码器等。其车体前部和后部的立体视觉摄像机用于障碍物探测和路径规划，摄像机安装着广角镜头，可以捕获较大场景，能够有效提高视觉探测效率。车体桅杆上的立体视觉摄像机主要有两个作用，一是用于全景立体图像序列的获取，二是机器人车体自身各部位状态的检测，如车轮是否被卡住或沉陷、操作手臂是否到位或到达要求的状态等。工作时，先由这些立体视觉摄像机摄取相关图像，然后，机器人做相应动作或将图像传回地面，由地面站人员处理。立体视觉摄像机的驱动电动机用 PID 伺服控制，通过脉宽调制、光学编码器监控输出轴位置。

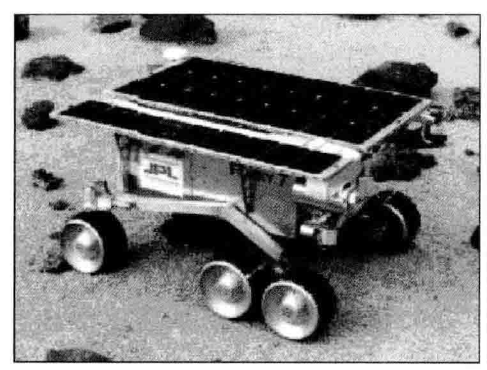




图 4.4 Rocky 7 火星探测机器人

Urbie 战术侦察机器人（图 4.5）是一款由美国 DARPA 资助，由 JPL 的机器视觉研发小组牵头，并由 JPL、iRobot 公司、卡内基－梅隆大学和南加州大学共同研制成功的城市侦察机器人。该机器人主要用于城市地形的战术侦察，也可用于紧急事态的处理和拯救行动的开展等。它能替代人在核污染、生化污染的城市环境下自动或遥控运行。该机器人配备了多种传感器，主要包括：双目立体视觉系统、三轴陀螺仪、加速计、GPS、激光测距仪等。其中，双目立体视觉系统采用了视场角为 97°×74°的摄像机，其电子快门可由程序控制，能适应各种光照条件。此外，机器人还装配了一个全向摄像机 Omnicam（由 Cyclovision 公司生产），可实时采集 360°场景的信息，其图像经过展开，可为遥控操作员提供全景图像。为了降低搜索空间的维数，该机器人所配视觉系统可将图像数据库转换到特征空间中，机器人运动时，通过主成分分析算法求解自身所在的位置。由于采用了全向摄像机，可以较好地解决系统的朝向问题，该系统还可根据预先设定的路线，或根据沿途的特征信息，实现路径跟踪。根据机器人在不同位置采集的图像，该系统也可对室内场景进行建模。

图 4.6 所示为美国卡内基－梅隆大学研制的月球探测地面实验车 Nomad，1997 年 6 月和 7 月，该实验车曾在智利的 Atacama 沙漠进行过长达 200 km 的穿越实验。实验的主要目的是验证其导航、定位、遥感成像和通信等关键系统在月球和火星表面长距离漫游时的有效性和可靠性。Nomad 装置的视觉系统共有三套，两套立体视觉系统位于车体顶部的桅杆架上，第三套位于车体前部下方。图 4.7 所示为 Nomad 采集到的立体视觉图像。Nomad 除了有六只眼睛外，还有一套激光测距系统来辅助立体视觉系统实现视觉导航。

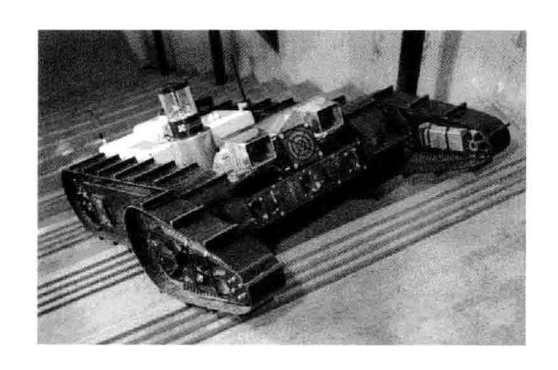


图 4.5　Urbie 战术侦察机器人



图 4.6　Nomad 机器人

4.1.3　国内机器视觉研究的现状及发展趋势

早前，由于使用机器视觉的行业在我国本身就属于新兴领域，再加之视觉产品技术的普及推广不够，导致机器视觉的应用几乎是空白，即便有也只是低端方面的。目前，随着我国配套基础建设的完善，以及技术与资金的不断积累，各行各业对采用图像和机

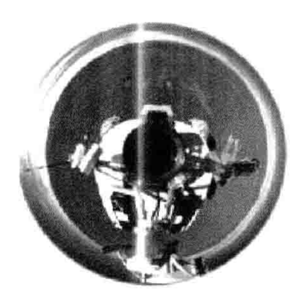
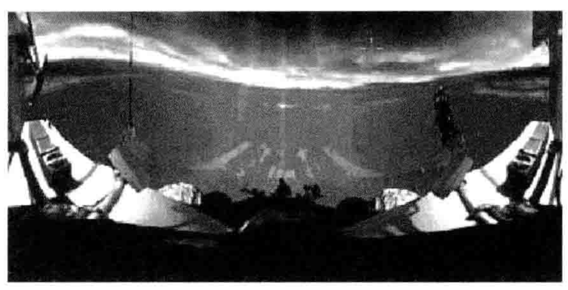



图 4.7 Nomad 采集到的立体视觉图像

器视觉技术的工业自动化、智能化需求开始广泛出现，国内有关大专院校、研究所和企业近年来在图像和机器视觉技术领域进行了积极思索和大胆尝试，逐步开始了工业现场的应用，如制药、印刷、矿泉水瓶盖检测等领域，但真正高端的应用还很少，因此，以上相关行业的应用和发展空间还很大。

随着机器视觉技术的不断发展和推进，近年来，国内很多科研机构在机器视觉方面取得了优异成果。例如，由北京中泰通科技发展有限公司和上海交通大学联合研制的 Super—DⅡ型排爆机器人（图 4.8），是国家“863”计划项目支持开发的具有自主知识产权的最新实用型产品。该机器人采用四个低光 CCD 摄像头，分别在机械手、爆炸物销毁器、车体前端和车体顶部的云台上各安装一个，这四个摄像头组成多方位的立体摄像观察系统，通过无线通信或有线通信方式将观察到的画面传输到操作系统的视频显示器上，便于操作人员操控机器人工作。由于机器人的视频监控系统采用四画面切换技术，既可以单幅画面显示，又可以四幅画面同时显示，从而为操作人员掌握系统信息提供了支持和帮助。



图 4.8 Super—DⅡ型排爆机器人

当前，视觉技术在我国应用较多的是车牌识别。不少科研机构或公司在车牌识别方面都已经逐渐开发出自己的产品，如北京绿睿科技公司、陕西维视公司、昆明利普视觉

公司等。其中，较具代表性的有北京绿睿科技公司研发的车牌识别系统。该系统所用图像传感器如图 4.9 所示，其拍摄到的汽车后部图像、经过软件二值化处理后的图像以及可供车牌定位与识别的图像分别如图 4.10、图 4.11 和图 4.12 所示。

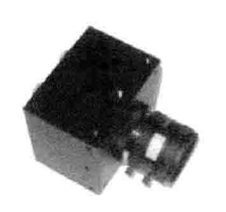


图 4.9　所用图像传感器



图 4.10　汽车后部图像



图 4.11　二值化后的图像



图 4.12　定位与识别

综观国内外机器视觉技术的发展趋势，专家们认为，机器视觉未来的发展既有硬件方面的，也有算法和软件方面的，既可能出现突飞猛进式的发展，也可能出现循序渐进式的发展，但不管如何，其未来的发展空间和应用领域是极为广阔的。根据现在掌握的信息和资料，人们给出了如下预测：

① 智能相机市场不断扩大，基于传统计算机的视觉系统将会减少；

② 检测精度和速度将随着图像传感器技术和芯片技术的发展而进一步增加；

③ 随着算法技术研究的深入，机器视觉的功能会进一步增加；

④ 机器视觉的应用领域将不断扩展到医药、零件制造、生物、航天等行业；

⑤ 专门、单一功能的视觉传感器在特定区域内将大有作为；

⑥ 机器视觉系统体积更小，与芯片技术的发展水平相对应；

⑦ 机器视觉系统图像处理速度更快；

⑧ 机器视觉系统更为简洁实用；

⑨ 机器视觉系统更为物美价廉；

⑩ 机器视觉系统将被“设置”，而不是被“编程”；

⑪ 机器视觉系统将生成自动或半自动的可执行代码；

⑫ 3D 算法工具将会得到更多应用；

⑬ 机器视觉系统将会拥有更多功能的算法工具。

尽管机器视觉在我国起步较晚，但随着新技术、新理论、新方法在机器视觉系统中的不断应用，机器视觉将在我国国民经济建设的各个领域发挥更大的作用，一方面机器视觉技术可以为国民经济建设带来新的产业增长点，向市场推广满足人们各种需求的机器视觉系统产品，产生直接的经济效益和社会效益；另一方面，通过机器视觉系统的应用，能够更加有效地发挥自动化装备的效能，提升自动化生产水平，增加产品的数量，提高产品的质量，带动整个产业的生产效率大幅提高，为加快国民经济的建设步伐带来新的活力。

4.2 探测子系统的硬件设计

对于智能作战机器人探测子系统来说，要想在全天候、全时段、全方位条件下圆满完成景物扫描、图像采集、图景拼接、目标识别、目标定位等任务，为打击敌洞库类目标提供作战依据，就必须精心构建相应的硬件平台和软件体系。其中，硬件平台是软件体系的支柱，是软件体系发挥作用、实现功能的基础。洞库类目标的图像采集和目标识别的过程虽然与软件算法的具体运用密切相关，但这些软件算法必须在硬件平台上才能得到最终实现，因此，智能作战机器人探测子系统的硬件平台建设十分重要，应当对其给予足够的关注，使其能够承担起相关的工作使命。

4.2.1 探测子系统硬件平台的整体构成

基于机器视觉的洞库类目标图像采集与目标识别技术是智能作战机器人探测子系统的核心技术，在图像采集与目标识别两项任务中，又以目标识别为重中之重。但图像采集是目标识别的基础与前提，若不能顺利、完整、正确地采集含洞库类目标信息在内的图像信号，则后续的目标识别工作就将成为“无源之水、无本之木”。

智能作战机器人是一个可以实现完全智能控制的系统，一旦遂行作战使命，就不需要人为干预运行，自身具有自主探测、自主识别、自动定位、自动点火等能力，这些能力的实现必然要求其具备一个完善的智能系统，支持这个系统的硬件平台当然也需要很强的数据处理能力、很好的稳定性、很高的可靠性以及很快的动态响应。

为实现智能作战机器人探测子系统图像采集、目标识别等功能，首先要对其硬件平台进行架构设计和特性分析，以确定合适的系统整体构成。为此，应根据智能作战机器人的项目考核指标进行探测子系统硬件平台的科学建构。

智能作战机器人的项目考核指标如下：

① 机器人外径 200 mm；采用以弹性元件作为触发装置的灵巧结构，装置着一套“可见光＋红外线”目标探测器和小型助推火箭；可携带 2～3 kg 燃料空气炸药战斗部；可通过多种运载工具或技术手段投放。

② 昼夜有效探测距离均为 100 m；目标正确识别率为 80%。

③ 小型火箭单方向上助推射程为 200 m；目标命中准确率为 80%。

④ 有效打击区域为 30 000 m^2。

通过仔细分析以上考核指标，可知智能作战机器人探测子系统需要在全天候、全时段、全方位条件下采集图像与识别目标，图像采集范围应涵盖其周围 100 m 范围内的景物。图像传感器在通过运动云台的水平扫描和俯仰扫描采集到周围景物的图像后，将采集到的图像信息传给图像处理系统，经过图景拼接、目标识别和目标定位后，输出相应结果给控制子系统，引导智能作战机器人完成作战使命。

由此可见，景物扫描、图像采集、图景拼接、目标识别、目标定位等任务是探测子系统的中心任务，也是项目的重点研究内容。由于景物扫描主要涉及运动云台，已在前进行了充分阐述，故对探测子系统来说，核心任务将集中在图像采集和目标识别上，所以，探测子系统硬件平台的搭建也应围绕着这两项任务科学、合理地展开。基于上述认识与考虑，探测子系统的硬件概略平台可按图 4.13 所示体系进行构建。

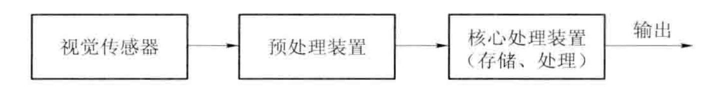


图 4.13　智能作战机器人探测子系统硬件概略平台的组成框图

在按图 4.13 所示内容进行系统具体硬件平台搭建时，应重视系统以下特性。

（1）实时性

景物扫描、图像采集、图景拼接等工作主要是依靠探测子系统的硬件平台来完成的，这些工作的实时性对后续目标识别、目标定位有着重大影响，是智能作战机器人能否克敌制胜的关键。为了保证其他子系统能够快速、稳定地运行，探测子系统硬件平台必须要有较高的实时性。

（2）准确性

作为一个需要精确采集图像、识别目标的测量仪器，探测子系统硬件平台必须要有很高的精度，这样才能在复杂多变的环境中完成景物扫描、图像采集、图景拼接等工作，为目标识别、目标定位提供可靠的信息和数据，保证智能作战机器人探测子系统能够看得清、认得准。

（3）稳定性

智能作战机器人的工作环境十分恶劣，这就要求探测子系统硬件平台必须具有稳定的性能，能够在艰难困苦的条件下可靠完成相应的工作。因此，在构建硬件平台时，应该着重选用那些性能稳定的元器件，保证探测子系统拥有稳定可靠的硬件平台。

（4）可移植性

智能作战机器人最终将成为系列产品，其探测子系统也将可能运用到不同场合或不同方面。此外，由于系统所用器件的成本较高，所以探测子系统硬件平台应当具有可移

植性，这样才能保证该硬件平台具有宽广的应用前景。

在以上特性要求中，稳定性、准确性、可移植性均可通过采用成熟的技术、可靠的器件、优良的系统配置和完善的软件编程来获得，而实时性则主要依据图像采集器件的性能水平、运动云台的工作能力和软件方法的质量水准来保证。综合考虑，其中要求最高的是实时性，因为对图像的分析处理过程包括景物扫描、图像采集、图景拼接、目标识别、目标定位等，数据处理量很大，既需要有高质量的视觉传感器，也需要有高效率的图像处理芯片，还需要有高速度的主控芯片。所以，构建智能作战机器人探测子系统硬件平台的核心问题便是选择合适的相关器件。

智能作战机器人的典型工作特点就是利用图像采集和目标识别技术来获得目标信息以完成对敌洞库类目标的打击与封锁，这就需要机器人各相关子系统密切配合、协调工作。探测子系统由于有图像处理和目标识别的特殊要求，需要引入图像处理芯片。经深入分析与反复考察，选择美国 TI 公司生产的 DSP C6000 系列芯片中的基于 C64x+内核的高性能多媒体处理器 TMS320DM6437（以下简称 DM6437）担当这一任务。DM6437 虽具有高达 600 MHz 的工作主频，运算功能十分强大，能满足图像处理的要求，但其控制端口较少，控制能力一般。由于图像处理工作本身就会耗费 DM6437 的大量资源，考虑到智能作战机器人还有电动机控制和接口控制等任务，因此，在图像处理芯片的基础上，应再搭建一块主控芯片，专门用来完成智能作战机器人控制子系统的相关功能。基于上述思路，智能作战机器人的硬件平台可以按图 4.14 所示形式进行构建。

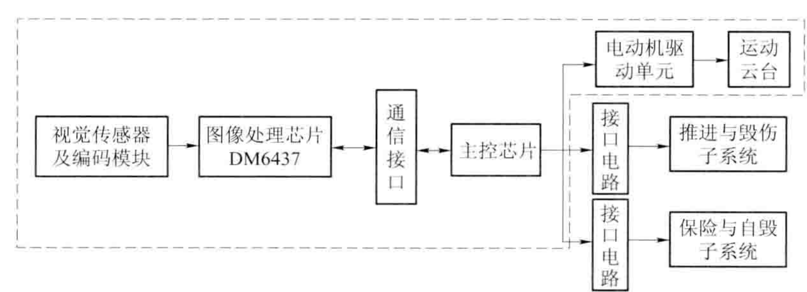


图 4.14　智能作战机器人硬件平台组成框图

（虚线框内为探测子系统硬件平台组成框图）

由于智能作战机器人的工作环境十分恶劣，其硬件平台在体积、质量、实时性、稳定性、可靠性等方面的要求还十分严格，因而在设计智能作战机器人硬件平台时，要减少系统体积和质量，提高其实时性、稳定性和可靠性，尽量采用集成芯片而不是分离元器件来搭建系统。

4.2.2　探测子系统硬件平台的设计与分析

传统的基于机器视觉的图像采集和目标识别系统主要包括 CCD 可见光传感器、视

频采集卡和图像信息处理模块等。这样的系统虽可连续、自动地提供有关目标和环境的图像信息，但由于体积和功耗相对较大，加上采集的图像质量易受光线和烟雾的影响，且不能提供目标的距离信息，因而难以满足智能作战机器人的作战需求，所以不能简单地将传统的基于机器视觉的目标探测系统移植到智能作战机器人上。

在传统的目标识别系统中，一般采用计算机作为处理机，利用一些现成的处理软件和算法，就可以完成许多特定的工作。这样的系统在硬件实现上较为简单，通常只需在软件上进行适当改进就能满足用户需求。但对于智能作战机器人探测子系统而言，体积小、质量轻、性能稳、速度快是需要严格保证的，这种苛刻的要求使得传统的目标识别系统难以发挥作用，必须在智能作战机器人探测子系统硬件平台的架构设计上另辟蹊径才行。随着嵌入式处理器技术的不断发展，其成本大幅下降，性能大幅提升，为机器视觉系统的小型化、轻量化、高速化提供了出路。智能作战机器人探测子系统硬件平台就是在这样的嵌入式技术之上搭建起来的，这对提高智能作战机器人探测子系统的智能化、自主化水平有着重要的意义。

智能作战机器人承担着在环境复杂、情况多变的情况下对敌洞库类目标打击与封锁的重要使命，作战使命的艰巨性要求探测子系统具有良好的实时性，同时，由于智能作战机器人探测子系统在遂行景物扫描、图像采集、图景拼接、目标识别、目标定位等任务时，信息处理量很大，这就要求在构建系统硬件平台时选择适合高速、大量数据处理的芯片和先进的图像信息处理方法。目前，图像采集与目标识别系统按照处理器选用不同大致可分为三类：

① 基于专用图像芯片的图像采集与目标识别系统。

② 基于 PC 机的图像采集与目标识别系统。

③ 基于 DSP 的图像采集与目标识别系统。

在上述系统中，基于专用图像芯片的图像采集与目标识别系统的核心是专用图像芯片，该图像芯片决定着系统的功能，其应用对象主要是针对某一类产品，如数码摄像机等，所以具有一定的局限性；而基于 PC 机的图像采集与目标识别系统最为普遍的就是采用图像采集卡获取数字化图像信息，通过运行相应的 PC 程序，实现图像的采集、处理、识别与显示，但是，目前基于 PC 机的图像采集与目标识别系统由于体积和电源供电的限制，很难做到嵌入式。相比基于专用图像芯片和基于 PC 机的图像采集与目标识别系统而言，嵌入式图像采集与目标识别系统可以完成图像的实时采集、传输以及实现各种图像的压缩算法和处理算法，根据不同的应用，还可以编制不同的图像处理程序，具有更大的灵活性，并且设计思路与实现途径十分简单，硬件一般采用通用的设计，即“CCD＋图像信号处理芯片＋FPGA/CPLD＋DSP”的模式即可实现。

1. 视觉传感器选型设计与特性分析

（1）视觉传感器选型设计

在图 4.14 所示探测子系统硬件平台组成框图中，视觉传感器主要负责对智能作战

机器人周围景物的图像采集工作。之所以在该平台中选用“可见光+红外”复合探测器作为视觉传感器使用，主要是考虑可见光图像采集部分可在光照充足的情况下完成周围图像信息的采集工作，而当光照不足时，红外线图像采集部分则可担负起周围图像信息采集的任务，如此安排既可以保证探测子系统昼夜工作，又可以降低系统功耗。对于视觉传感器来说，主要任务是完成对机器人周围图像信息的采集工作，并将这些信息转换成相应的电信号。在选用视觉传感器时，性能、质量、体积、接口形式、安装方式等均属重点考察的因素，因为它们直接关系到所搭建的智能作战机器人探测子系统硬件平台的合理性与可行性。



图 4.15 VCM50 可见光/红外线智能探测器

根据智能作战机器人探测子系统的总体要求，在深入了解国内外相关器件工作性能和使用条件的基础上，通过认真分析与反复选型，选用 VCM50 可见光/红外线智能探测器（图 4.15）作为智能作战机器人探测子系统的视觉传感器。

VCM50 是世界上体积最小的智能摄像机，由德国 Visim Conpents 公司生产，尺寸为 ϕ30 mm×100 mm，内置高性能 CCD 传感器、图像采集卡、图像存储器、DSP 高速处理器。根据环境照度的不同，其可见光/红外成像功能可自动切换，能够保证智能作战机器人在质量、体积、昼夜作战方面的实际要求。

（2）视觉传感器特性分析

在探测子系统硬件平台中（图 4.14 虚线框部分），VCM50 主要用于对目标图像的采集和对采集图像的降噪与压缩预处理，其主要特点如下：

① 摄取图像最高每秒达 100 帧。

② 逐行扫描图像（640×120）或 25 幅逐行扫描图像（640×480）。

③ 防护等级可达 IP65。

④ 质量为 80 g，尺寸为 ϕ30 mm×100 mm。

⑤ 自带 2 路 24 V 数字输入和 4 路数字输出。

⑥ 有效探测距离超过 100 m。

⑦ 带 115 kb/s RS232 口。

⑧ 配超高速 DSP，每秒执行 0.375G 个指令。

⑨ 快门时间软件设置。

⑩ 信噪比≥48 dB（AGC OFF）。

VCM50 可见光/红外线智能探测器参数规格和内置视频采集卡的特性指标分别见表 4.1 和表 4.2。由表可知，VCM50 不但体积小、质量小、昼夜两用，而且其他相关

参数也十分优异，完全能够满足探测子系统硬件平台构建的原则与要求。

表 4.1　VCM50 参数规格一览表

名　　称	规格或数值
视频信号	NTSC
摄像传感器	1/4 type Super HAD CCD
有效像素	768（*H*）×494（*V*）
水平分辨率	470TV lines（广角端）
镜头	10 倍光学变焦，40 倍数字变焦，*f*=3.1～31
水平视角/（°）	6.6～65
Pan/Tilt	水平+100°，垂直+25°
视频输出	VBS，Y/C
电源/V	DC 10.8～13
外形尺寸/（mm×mm×mm）	113（*W*）×120（*H*）×132（*D*）
质量/g	80

表 4.2　VCM50 内置视频采集卡特性指标一览表

名　　称	规格或数值
接口类型	PCI/S 端口/复合端口
编码方式	MPEG
视频输入格式	模拟信号
视频输出格式	AVI/MPEG－1/MPEG－2
图像分辨率/dpi	640×480
音频采样	16 位/44 kHz
功能特效	一个系统可同时使用多卡/采集全帧视频可达到 30 帧/s

2. 图像处理芯片（主处理器）选型设计与特性分析

（1）图像处理芯片（主处理器）选型设计

通过对图 4.14 所示探测子系统硬件平台组成框图的深入剖析与深刻理解，在视觉传感器选定为 VCM50 后，考虑到智能作战机器人主要是依据图像采集与目标识别的结果遂行作战使命，该图像采集与目标识别系统可采用双 DSP 芯片组建方案，即由主处理芯片和协处理芯片（即为前述控制子系统中的主控芯片）协同工作，完成图像采集、目标识别以及对外围设备的控制。

通过对比分析，选择美国德州仪器（TI）公司生产的 TMS320DM6437 为主处理器

加上必要的外围芯片电路组成基于 DSP 的智能作战机器人最小图像采集与目标识别系统硬件平台，如图 4.16 所示。

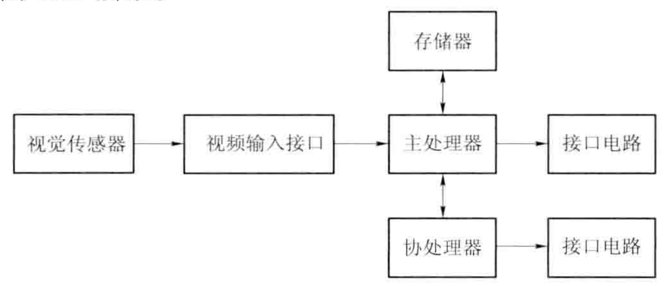


图 4.16 基于 TMS320DM6437 的图像采集与目标识别系统硬件平台组成框图

由图 4.16 可知，该硬件平台主要由视觉传感器、视频输入接口、主处理器、协处理器、存储器，加上 I/O 接口、JTAG 接口、电源部分以及复位部分等组成（实物如图 4.17 所示）。图中主处理器为 DM6437 芯片，协处理器则由控制子系统中的主控芯片 F28015 担当。F28015 不但和 DM6437 有相同的加工工艺和电平定义，而且还有许多功能相同的子模块，使得两者间的集成协调工作更为容易。视频输入接口为 TVP5146 解码芯片，存储器包括 1 个 128 MB Flash、2 个 128 MB DDR2 SDRAM，电路板外形尺寸为 93 mm×125 mm。

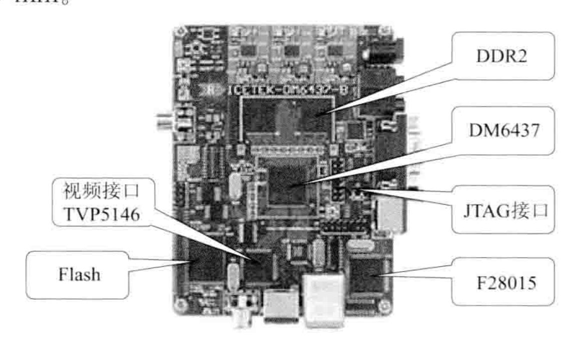


图 4.17 基于 TMS320DM6437 的图像采集与目标识别系统硬件平台实体图

基于 TMS320DM6437 的图像采集与目标识别系统的工作原理是：先由 VCM50 采集图像，随之输出模拟信号，此模拟信号经视频解码芯片 TVP5146 转换成数字信号，协控制器芯片 F28015 通过 I^2C 总线对视频解码芯片进行控制，进而控制数字信号。然后 TVP5146 的数据线与 DM6437 的视频口相连，把图像数据送入图像处理芯片 DM6437 中，由 DM6437 对输入的数字图像信号进行全景拼接、图像预处理、目标识别等处理工作，处理程序可以由上位机通过 JTAG 口下载到 DM6437 中的 Flash 里，下载不同的程序就可以实现不同的图像处理功能。采集回来的信息通过 EMIF 口以 EDMA 导入 DDR2 SDRAM 中，对信息进行存储。这是因为 DM6437 两级缓存的空间不够，不能满足图像信息量存取的需要，所以得先把图像信息放入 DDR2 SDRAM 中，再对图

像信息进行处理。处理的结果将通过 I^2C 总线告知协处理器 F28015，后者通过 I/O 口输出相应的控制信息。

在该系统中，电源部分输入为 5 V，通过电压转换芯片可得到 1.2 V、1.8 V 和 3.3 V 的电压。其中，1.2 V 供电用于 DSP 内核，3.3 V 供电用于 I/O 接口、存储和板上的其他芯片，而 1.8 V 供电用于 DM6437、DDR2 接口和 DDR2 内存。图 4.18 所示为基于 DM6437 的图像采集与目标识别系统的工作原理框图。

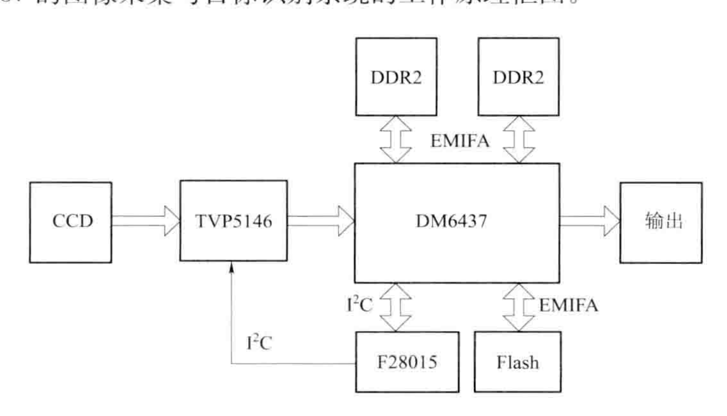


图 4.18　基于 TMS320DM6437 的图像采集与目标识别系统工作原理框图

（2）图像处理芯片（主处理器）特性分析

图像处理芯片 TMS320DM6437 是 TI 公司最新推出的，专门为高性能、低成本视频应用而开发的 DSP 处理器，其系统结构框图如图 4.19 所示。

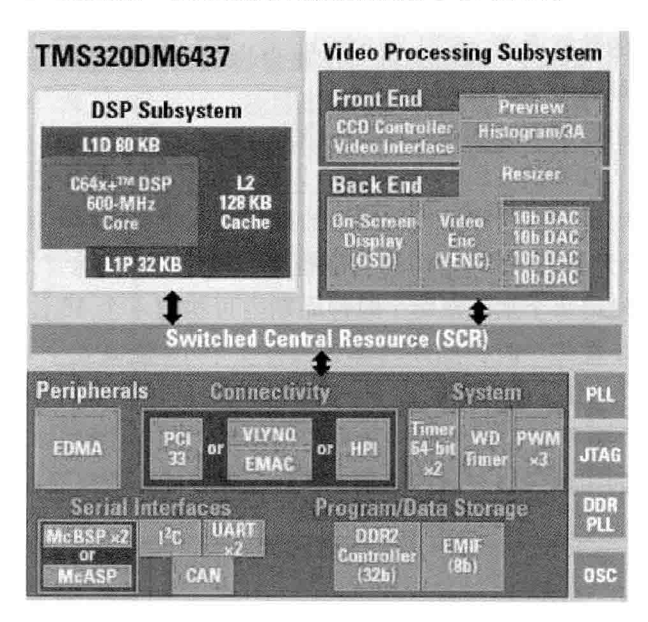


图 4.19　TMS320DM6437 系统功能框图

DM6437 的主频为 600 MHz，是一款使用达芬奇（DaVinci（TM））技术的 32 位定点 DSP 处理器，内核为 C64x+。在体系结构上，DM6437 采用了 VelociTI. 3 超长指令字结构和类似于 RISC 的指令集，使用大量统一的寄存器堆，结构规整，具有潜在的易编程性和良好的编译性能。另外，DM6437 采用程序总线和数据总线分离的修正哈佛结构，多数指令拥有相同的流水级数，便于程序进行流水的优化。可支持 D1 解析度的 H. 264 视频编码，或根据应用要求运行完整的音视频与联网功能，而成本则比 TI 前代 DSP 数字媒体处理器下降了 50%。

TMS320DM6437 DSP 的硬件组成如下：

1）中央处理器

为了满足图像处理的需要，DM6437 采用 TI 第 3 代超长指令集结构（VelociTI. 3）和流水线的 TMS320C64x+DSP 内核，在一个指令周期可并行处理多条指令。主频可达 600 MHz，支持 8 个 8 位或 4 个 16 位并行 MAC 运算，峰值处理能力高达 4 800 MIPS，可实时处理 8 路 CIF 或 3 路 D1 格式的 H. 264 编码算法。

2）CPU 的组成部分

DM6437 的 CPU 包含以下部分：

① 2 个通用寄存器组（A 和 B，各 32 个 32 bit 通用寄存器）。

② 8 个功能单元（L1、L2、S1、S2、M1、M2、D1 和 D2），可执行逻辑、移位、乘法、加法和数据寻址等操作。

③ 数据寻址单元（. D1 和 . D3），专门负责寄存器组与存储器之间的数据传递。

④ 从内存读取的数据通道（LD1 和 LD2）。

⑤ 2 个写内存的数据通道（ST1 和 ST2）。

⑥ 2 个数据地址通道（DA1 和 DA2）。

⑦ 2 个寄存器组数据交叉通道（1X 和 2X）。

除读取（Load）和存储（Store）类指令以及程序转移类指令外，其他所有算术逻辑运算指令均以通用寄存器为原操作数和目的操作数，使程序能高速运行。

如图 4. 20 所示为 DM6437 CPU 的功能框图。DM6437 内含 2 个 32 位乘法器和 6 个算术逻辑单元，使得每个乘法在每个时钟周期内可执行 4 个 16 位乘累加或 8 个 8 位的乘累加并行运算，在每个时钟周期内都可执行 4 个 16 位或 8 个 8 位的加减、比较、移动等运算。在 600 MHz 的时钟频率下，DM6437 每秒可以进行 24 亿次 16 位的乘累加或 48 亿次 8 位的乘累加运算。这样强大的运算能力使得 DM6437 完全可以高质量、高速度地进行实时的图像采集与目标识别工作，保障智能作战机器人可靠、稳定地遂行作战任务。

3）高速缓存结构

为了解决 CPU 和存储器之间的带宽问题，必须高度重视存储器体系的设计。在存储器体系结构设计中最重要的问题是如何解决存储器容量和速度与成本要求之间的矛

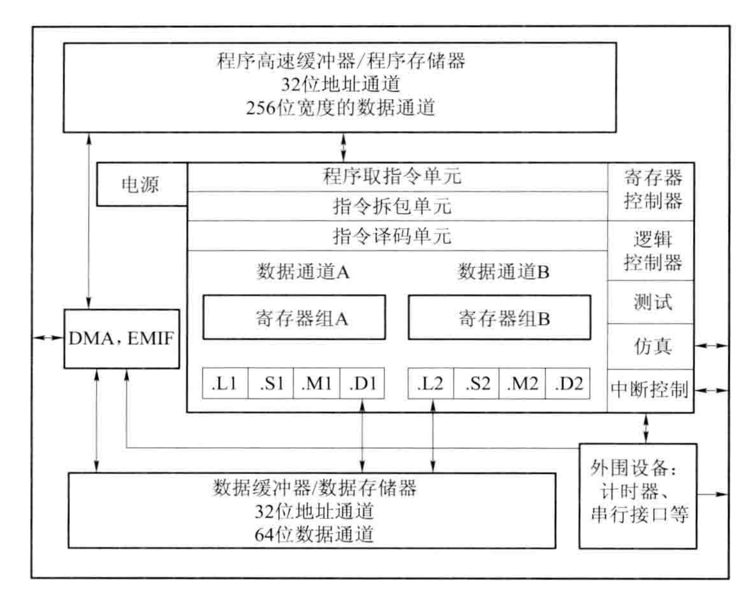


图 4.20　DM6437 CPU 功能框图

盾。片上存储器速度快，但容量小、成本高；片外存储器容量大、成本低，但速度慢，为解决其中矛盾，产生了多级存储器体系结构。这种结构就是把存储器分为若干级别，寄存器离处理器最近，速度最快而容量最小；高速缓存（Cache）容量较大而速度次之；主存（Memory）离 CPU 最远，速度最慢而容量最大。

DM6437 CPU 的两级高速缓存结构框图如图 4.21 所示。在 DM6437 中，Cache 分

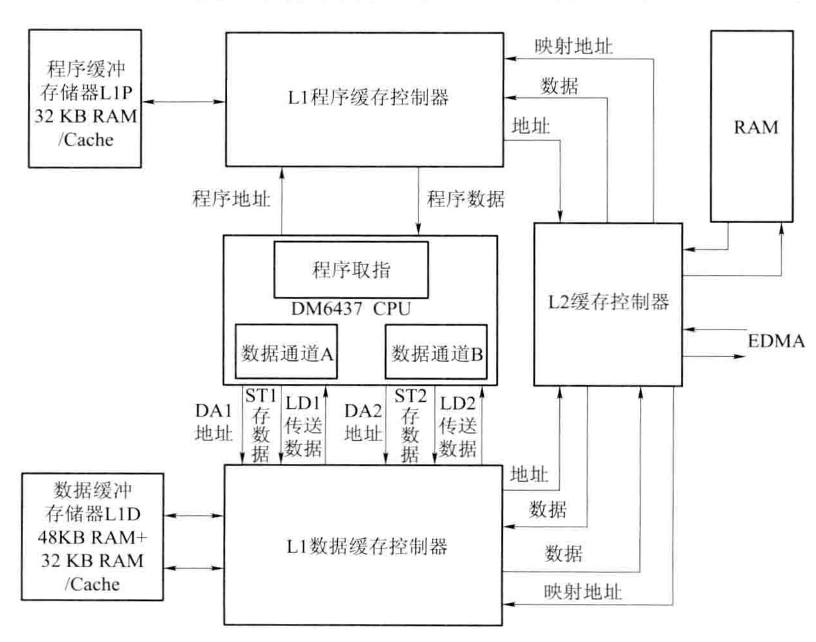


图 4.21　DM6437 CPU 的两级高速缓存结构框图

为 L1 和 L2 两级，CPU 和一级高速程序缓存及一级高速数据缓存直连。两块 Cache 中，一块为 32 KB RAM/Cache 可配置的 1 级程序缓冲存储器 L1P，另一块为 48 KB RAM+32 KB RAM/Cache 可配置的 1 级数据缓冲存储器 L1D，它们都工作在 CPU 全速访问状态；二级缓存为 128 KB RAM/Cache 可配置的 2 级程序/数据缓冲存储器 L2。其存储器体系结构更为灵活、更为合理，有利于提高图像处理程序/数据的存取效率。两级 Cache 的工作原理则如图 4.22 所示。CPU 只对 L1 的数据进行访问，程序代码和数据必须存储到 L2 中，经 L2 到 L1 的逐级搬移才能被 CPU 访问。在 CPU 处理片内的数据时可以通过 EDMA 把片外的数据导入片内，并行工作以提高效率。因为内部存储器的工作频率与 DSP 内部时钟同频，远远高于片外存储器的频率，于是解决了使用 EDMA 方式时，DSP 外部时钟频率小于内部时钟频率的问题。合理利用两级缓存配合低工作频率的外部存储器，系统的效率能够达到全部使用高工作频率的内部存储器的 80%～90%。应当指出的是，在实时信号处理中则必须要使用 L2SRAM。

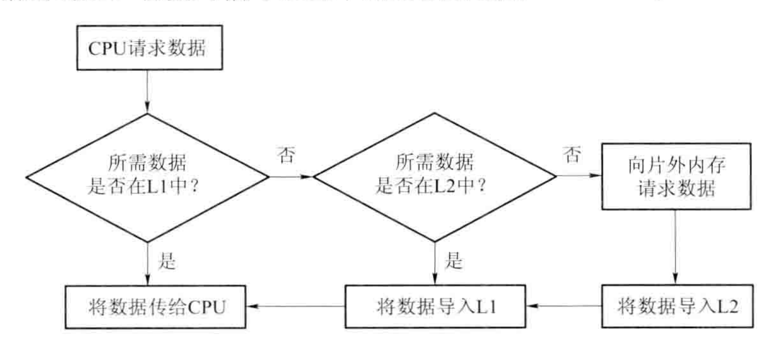


图 4.22 两级缓存的访问原理

二级缓存 L2 的分段和大小配置可有多种方式，其中的一种配置方式是将二级缓存全部用来作为外部内存的映射（Mapped RAM），其他配置方式既有直接映射，也有 4 种集合相关法（4 Way Cache）的方式，被映射的内存用来存储流媒体数据或中断服务程序等。如何合理配置 Cache 与 SRAM 的大小对 L2 来说十分重要，合理配置的总原则是将尽量多的关键数据分配在片内。可以将 DM6437 片内内存的一部分配置成 Cache，Cache 越大越好。对于不同的应用，需要有不同的配置。在此将 Cache 配置成 64 KB，剩余的 64 KB 则作为 SRAM 使用。L2 的 SRAM 还不够大，难以存放系统所有的数据和程序，因此可将通用的代码和相关数据放在片外，并将该存储空间设置成允许 Cache 方式，这种方式将把 L2 的 SRAM 留给对性能要求更高的信号处理部分的代码。图 4.23 和图 4.24 所示分别为 DM6437 一级、二级 Cache 的配置方法。

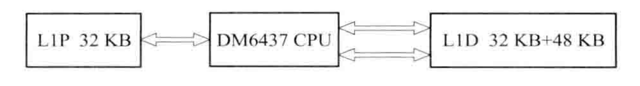


图 4.23 一级缓存配置方法

128 KB Mapped RAM	96 KB Mapped RAM	64 KB Mapped RAM	96 KB Mapped RAM	4 Way Cache 128 KB
	4 Way Cache 32 KB	4 Way Cache 64 KB	4 Way Cache 32 KB	

图 4.24　二级缓存配置方法

4）增强型 DMA 控制器

增强型直接内存存取（EDMA）是 DSP 中用于快速数据交换的一种重要技术，具有独立于 CPU 的后台批量数据传输的能力。片上具有 64 通道增强型 DMA 控制器 EDMA3，支持复杂的数据类型的传输，有利于图像数据的高效传输和格式变换。EDMA3 包括两种通道类型：DMA channels（64 个）与 QDMA channels（8 个），每个通道均由传输队列控制器控制，并有一个对应的参数设置集。EDMA 与 QDMA 的主要区别在于两者触发方式不同。

5）外部存储器接口

DM6437 的外部存储器接口包括同步 DDR2 存储器接口，这个 32 位、200 MHz、256 MB 寻址空间的专用 DDR2 存储器接口主要用于接驳高速、大容量的 DDR2 存储器，以存储代码和数据；此外，还有异步存储器接口（EMIFA），这个 8 位、64 MB 寻址空间的异步存储器接口主要用于接驳 8 位 Nor Flash 或 Nand Flash，以存储固化代码。

6）片上外设接口

DM6437 的片上外设包括：

① 一个专用的单通道视频输入接口。该接口既可以方便地与各种数字视频输入标准对接，还具有常用的视频预处理功能。

② 一个专用的单通道视频输出接口。该接口既可以提供多种模拟视频输出标准接口功能，又可以提供各种数字视频输出标准接口功能，并且在视频输出之前，还支持多个视频窗口管理及在视频画面上叠加文本数据。

③ 一个多通道音频串口。该串口可无缝接口音频 Codec 器件，实现模拟视频信号的输入/输出。

④ 一个 I^2C 总线。该总线可无缝连接视频解码器/编码器和音频 Codec 的控制口，方便实现音/视频编解码器的控制。

⑤ 两个多通道缓冲串行端口（McBSPs）。

⑥ 一个多通道音频串行端口（McASP0）。

⑦ 两个 64 位通用定时器。每个 64 位通用定时器可分别配置为两个独立的 32 位通用定时器。

⑧ 一个 64 位看门狗定时器。

⑨ 32 位 PCI 总线，方便与 PC 机接口，实现多板并行工作。

⑩ 以太网（MAC）。该 10/100 M 以太网 MAC 能够极为方便地满足嵌入式视频网络化要求。

⑪ 16 位 HPI 接口。该接口能够十分方便地实现主/从结构的双处理器视频处理系统。

⑫ 三个脉宽调制器（PWM）。

⑬ 通用输入/输出接口（GPIO）。

⑭ 两个通用异步接收/发送装置（UART）。

由上可知，DM6437 非常适于作为单通道视频处理系统的主处理器。所以，下面将对 DM6437 的片上视频输入/输出接口逐一介绍。

7）视频子系统 VPSS

DM6437 片上的视频输入/输出接口统称为视频子系统 VPSS，系统由两部分组成：一是视频处理前端 VPFE，用于输入数字视频数据，为多种标准的数字视频输入提供接口，并为输入的数字视频数据做必要的预处理；二是视频处理后端 VPBE，用于输出数字视频数据，以驱动显示器显示视频图像。DM6437 视频处理前端（VPFE）由一个 CCD 控制器（CCDC）、一个预览器（Previewer）、直方图模块、自动曝光/白平衡/对焦模块（H3A）和缩放器组成。VPFE 为视频处理系统提供了两大功能：一是为多种标准数字视频输入提供接口，二是为各种视频处理应用提供必要的预处理。DM6437 数字视频输入接口被称为 CCD 控制器，为输入数字视频流提供了数据通路和必需的同步信号，其功能如下：

① 16 位视频数据总线。

② 像素时钟频率最高可达 75 MHz。

③ 可直接接 CCD 或 CMOS 图像传感器。

④ 可接 8/10 位 BT.656 标准数字视频流。

⑤ 可接 8/16 位带行、场同步信号的 YCbCr 4∶2∶2 格式数字视频流。

对于视频监控类应用来说，视频信号一般为来自摄像头的模拟视频信号，其经视频解码器转换为 8/10 位 BT.656 或 8/16 位带行、场同步信号的 YCbCr 4∶2∶2 数字视频流，再输入 DSP 中进行处理。

为适应各种视频处理的具体情况，DM6437 的视频前端还提供了以下 3 种具有预处理功能的器件或模块：

① 预览器 Previewer。该预览器可将来自 CCD 控制器或来自外部存储器的 RGB 图像格式转换为 YUV422 图像格式。

② 缩放器 Resizer。该缩放器可接受来自预览器或文本存储器的视频数据，可由硬件实现图像大小的缩放功能，且水平和垂直方向的缩放比例相互独立，缩放范围为 1/4x～4x（x 指放大倍数）。

③ H3A 模块：H3A 模块可由硬件实现自动曝光、自动白平衡、自动对焦。首先接受 RGB 图像格式，并将图像细分成二维像素块，像素块的大小、位置可编程，然后对像素块进行累加和峰值统计，最后实现 3A 控制输出。

DM6437 视频处理后端（VPBE）由一个屏幕显示引擎（OSD）和一个视频编码器（VENC）组成。VPBE 用于实现视频图像的输出显示，其具体功能如下。

① 视频窗口管理。显示屏上的一幅图像可以分成若干个区域，每个区域可以代表不同的视频源，即来自不同的视频输出缓冲器。在输出显示之前，需要将来自不同视频输出缓冲器的视频数据复合成一个完整的数字视频流，这个过程称为视频窗口管理。VPBE 能够高效参与视频窗口的管理工作。

② 图形、字符 OSD 窗口管理与叠加。在图像处理时，经常需要将某些图形、字符等信息叠加到视频图像上一起输出显示，这些叠加到视频图像上的图形、字符存储于独立的缓冲器中，因而在输出显示之前，还需要将来自图形、字符缓冲器的数据复合进输出数字视频流中，这个过程称为图形、字符 OSD 窗口管理与叠加。VPBE 在上述过程中可发挥重要作用。

③ 视频输出编码。将复合后的完整的数字视频流以一定的时序格式进行输出，这个过程称为视频输出编码。VPBE 在这个过程中也能大显身手。

除此之外，DM6437 视频处理后端可以同时支持 2 个视频窗口和 2 个图形、字符 OSD 窗口管理，并可支持 8 种视频窗口与 OSD 窗口数据叠加方法。DM6437 的视频输出编码既可以用于直接驱动模拟监视器的标准模拟视频输出，也可以用于直接驱动带数字接口的显示器的多种标准数字视频输出。应当注意的是，数字输出接口兼容高清输出，模拟输出则要外接高清编码芯片。

通过集成预览引擎、图像缩放工具和屏幕视控加速器，VPSS 实现了性能高达 40% 的提升，从而为 DSP 预留了空间，以便其添加更多功能。

8）扩展内存接口（EMIF）

DM6437 的外部存储器接口支持与各种外部设备的无缝接口，这些外部设备包括同步 DRAM（SDRAM）、异步器件（SRAM、ROM 和 FIFO）以及外部共享存储器设备。DM6437 的 EMIF 是 64 bit，和同步内存相连接，最大总线速度为 133 MHz，EMIF 能够对地址空间进行 8 bit、16 bit、32 bit 和 64 bit 的同步或不同步的存取。EMIF 有三个内存控制器，其中 SDRAM 控制器支持 16～256 MB SDRAM 器件。此外，还拥有可编程的同步或不同步控制器，通过这些控制器可控制各种同步和异步存储设备。可编程同步控制器提供和各种同步存储设备的直连，可编程异步控制器提供和异步存储设备的直连。

3. 视频解码芯片选型设计与特性分析

（1）视频解码芯片选型设计

由图 4.18 可知，视频解码芯片在基于 DM6437 的图像采集与目标识别系统中起着

重要作用，它在视频传感器 VCM50 与主控芯片 DM6437 之间架起连接的桥梁，将视频传感器传来的模拟信号转换成数字信号，供主控芯片处理。通过仔细分析与比较，选择 TVP5146 视频解码芯片担负这一责任。TVP5146 是一款高品质、单芯片的数字视频解码芯片，能将所有流行模拟视频格式数字化并解码转换成数字视频信号。该解码芯片支持模拟量到数字量（A/D 转换）的转换，并将其转换成为 RGB 和 YPbPr 分量信号，同样，它还可实现将 NTSC 制式、PAL 制式、SECAM 复合视频和 S-视频到部分 YCbCr 的 A/D 转换和解码。该解码芯片包括 4 个 10 bit 的每秒 30 MB 采样速率的 A/D 转换器（ADCs）。每个模数转换器对应的模拟通道包含一个模拟电路的钳位输入参考电压，并将其应用于可设计的增益和偏移。TVP5146 共有 10 个视频输入端子可用于组合 RGB、YPbPr、CVBS 或 S-Video 信号的配置。

（2）视频解码芯片特性分析

在 TVP5146 中，成员信号、复合信号或 S-Video 信号在 2 倍的方形像素或 ITU-R 的 BT. 601 的时钟频率下采样，线路锁定，然后被 1 倍的像素率替代。CVBS 解码采用五线自适应梳状滤波为亮度和色度数据路径，以减少跨亮度和跨色度产物。TVP5146 还可起到色度限制过滤器的作用。对于 CVBS 和 S-Video 输入，用户可以通过一个 I^2C 接口控制视频的特性，如对比度、亮度、饱和度、色调等。此外，还包括亮度达到顶峰（锐度）的可编程增益，以及专用的色度瞬态改善（CTI）电路，其内置的色彩空间转换器可用于 RGB 数据部分的解码。

TVP5146 可以选择以下输出格式：20 位 4∶2∶2 YCbCr 或 10 位 4∶2∶2 YCbCr。

TVP5146 所产生的同步、消隐、扫描场、活动的视频窗口、水平和垂直同步、时钟、同步锁相（下游视频编码器同步）、主机 CPU 中断和可编程逻辑 I/O 信号等，构成了数字视频的输出。

TVP5146 能实现先进的场逆程（VBI）数据检索。VBI 数据处理芯片（VDP）进行图文错误的分段、剖析与检查，然后封闭说明（CC）和其他 VBI 数据。内置的 FIFO 能够存储多达 11 行的图文资料，配以适当的主机端口同步，就可以实现全屏幕图文的检索修复。TVP5146 还可以输出基于主机 VBI 处理的 2 倍采样亮度数据格式，且为行处理像素锁定 CVBS 和 RGB/YPbPr 格式输入提供了选择。

TVP5146 的主要组成部分如图 4. 25 所示，主要包括：

① 含有噪声的弱信号的鲁棒同步检测以及 VCR 欺骗模式。

② 用 2D、5 线、自适应梳状滤波器或色度陷阱分离的 Y/C 信号。

③ 在 CVBS 和 YPbPr/RGB 分量视频输入（色差支持）像素与像素之间的快速输入切换，4 个 10 bit 的每秒 30 MB 采样速率的 A/D 转换器与模拟预处理器［钳制和自动增益控制器（AGC)］。

④ 亮度处理器。

⑤ 色度处理器。

⑥ 组件处理器。

⑦ 时钟/定时处理器和电源关闭控制。

⑧ 软件控制的省电待机模式。

⑨ 输出格式程序。

⑩ I^2C 总线接口。

⑪ VBI 数据处理器。

⑫ Macrovision 公司的保护检测电路（1、2、3 型和单独的彩色条纹检测）。

⑬ 3.3 电压容错数字 I/O 端口。

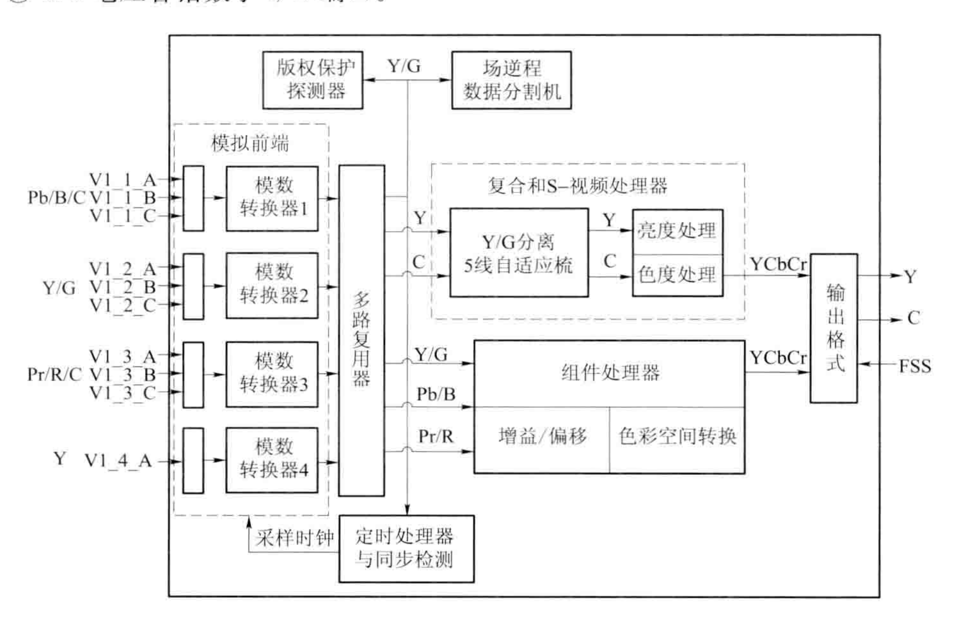


图 4.25　TVP5146 解码芯片主要组成部分

4. 协处理器选型设计与特性分析

（1）协处理器选型设计

为了使智能作战机器人整体控制功能更加完善，同时，也为了使探测子系统和控制子系统的功能衔接更加流畅，在协处理芯片的选型上，特地选用与 DM6437 同出一门的 DSP C2000 系列控制芯片，型号为 TMS320F28015（简称 F28015）。F28015 在前述控制子系统的硬件组成中已有详细介绍，在此不再赘述。

（2）协处理器特性分析

在探测子系统中，作为协处理器的 F28015，将承担起与图像处理芯片 DM6437 的通信、控制两路步进电动机精确定位，以及适时触发时序控制信号等多重任务。

F28015 功耗极低，性价比较高，LQFP 封装尺寸大小不超过 12 mm×12 mm，这使得它非常适用于对成本、功耗及体积有严格要求的嵌入式控制场合。

4.3 洞库类目标特征分析与样本建模

无论在战前，还是在战时，各种洞库均是敌对双方储存武器装备、军用物资的重要场所。尤其是倚山而建的各种大型洞库，可凭借其隐蔽、坚固的特点，储存有生力量、武器装备和战略物资，成为与敌长期周旋的重要战略据点。据相关资料统计，在美伊战争中，伊方有70%以上的武器装备和军用物资是用洞库存储的。因此，有效地发现、打击、摧毁敌方洞库，可极大地提升我军在当前和未来的反侵略、反分裂、反霸权、反恐作战中制胜的概率，掌握战争的主动权。由于敌洞库类目标是智能作战机器人探测、识别和攻击的主要对象，因而以洞库类目标的特征分析与样本建模为主要研究内容，对洞库类目标的外形特点和结构特征进行深入研究和正确理解，为智能作战机器人成功遂行作战使命提供了理论基础和技术条件。

4.3.1 洞库类目标特征分析

1. 洞库类目标特征的提取

军用洞库一般均倚山傍崖而建，大小与所存储和隐藏的武器装备、战略物资的类型有关。洞口高度从数米到数十米，宽度从数十米到几十米。如图4.26和图4.27所示为典型军用洞库和各类洞库的相关照片。

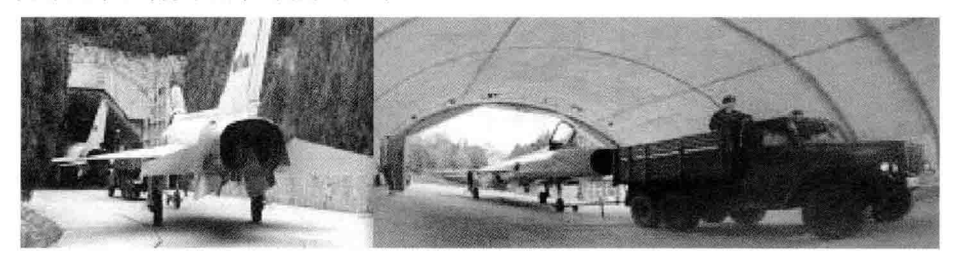


图4.26 典型军用洞库情景图

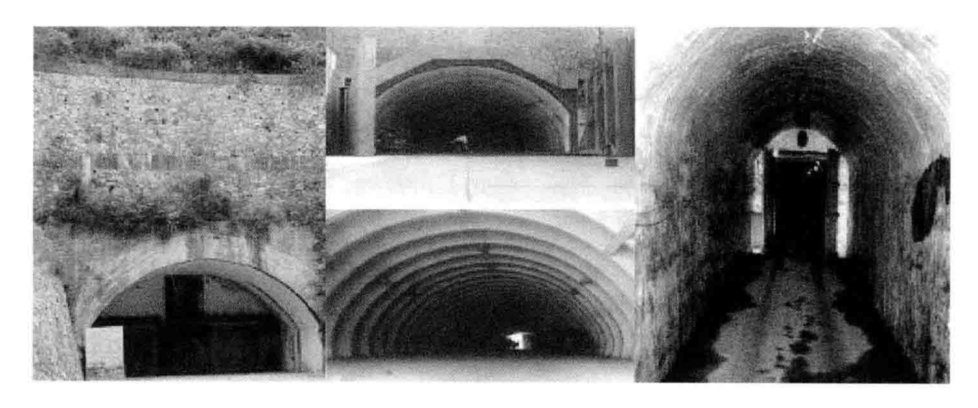


图4.27 各类洞库相关图片

尽管军用洞库的大小有所不同，但是根据结构力学的相关原理，军用洞库一般设计成下列 3 种结构形式：矩形、抛物线形＋矩形、抛物线形，这三种洞库的断面形状如图 4.28 所示。

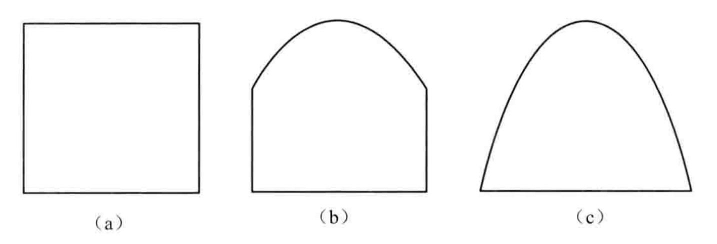


图 4.28　军用洞库断面形状图

(a) 矩形；(b) 抛物线形＋矩形；(c) 抛物线形

为了能够在复杂山体背景条件下将敌方洞库类目标正确识别出来，须圆满完成洞库类目标的特征提取工作。由于所提取的目标特征直接关系到智能作战机器人探测子系统能否准确辨认敌洞库及其方位所在，因此，所提取的洞库类目标特征必须具备以下两个特点：

① 特征简单，便于提取。

这主要是从智能作战机器人探测子系统运行速度方面来考虑的，如果目标特征简单，便于提取，那么相应的目标识别算法也就简单，运算量就小，系统运行速度就会很快，可以把图像处理结果快速返回给控制子系统，为智能作战机器人遂行作战使命抢占先机。

② 特征稳定，便于识别。

这主要是从智能作战机器人探测子系统目标识别率方面来考虑的，如果目标特征稳定，便于识别，那么需要检测的特征信息量也就少，编程相对简单，系统识别正确率会显著提高，而误判的概率则会明显降低，同时还会相应提高系统运行的速度，所以这一特点对探测子系统来说极为重要。

经过对图 4.28 所示军用洞库断面形状的认真分析与反复考察，选择洞库门口的形状作为目标特征量，这是因为图示的洞库断面形状可抽象成“直线与直线”或“直线与弧线”的不同组合，能够极好地满足目标特征提取的相关要求，是非常理想的目标特征量。

2. 洞库类目标特征的分析

(1) 目标样本采集

由于目前搜集敌方军用洞库类目标相关图像信息存在实际困难，可将在形状上与军用洞库相似的公路隧道等作为模拟参照物进行目标特征研究。2008 年 4 月—2009 年 5 月期间，多次将北京市门头沟区的“东方红隧道”作为模拟军用洞库进行目标的样本采集，在距隧道洞口 30 m、50 m、80 m 处对该模拟目标进行拍摄采样，图 4.29、图 4.30 和图 4.31 分别为采样结果。

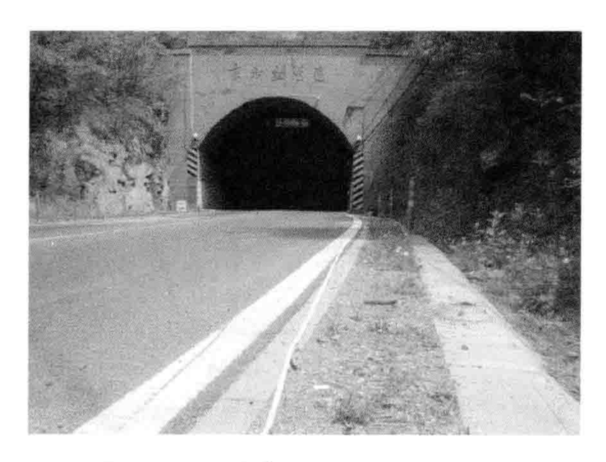


图 4.29 距隧道洞口 30 m 处目标图像

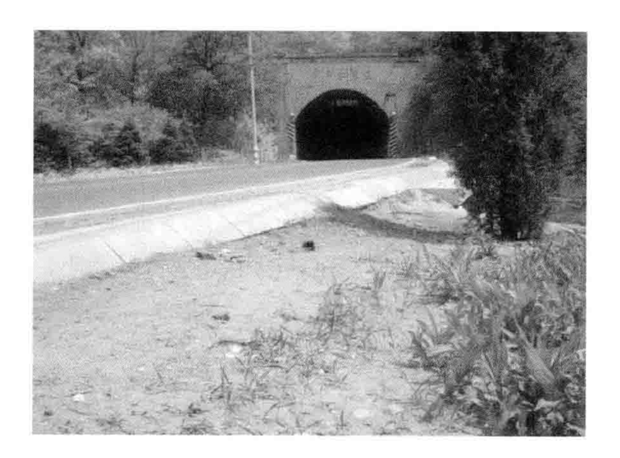


图 4.30 距隧道洞口 50 m 处目标图像

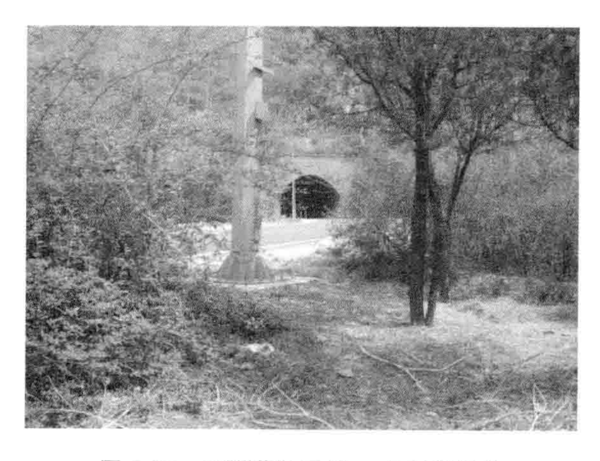


图 4.31 距隧道洞口 80 m 处目标图像

（2）目标特征分析

前已述及，为了弥补军用洞库图像资料收集方面的不足，特地选择具有与军用洞库相似结构特点的公路隧道作为目标参照物展开研究，因而对军用洞库的目标特征分析就可转化为对公路隧道的目标特征分析。为了给智能作战机器人探测子系统提供科学、合理、完整、可靠的目标识别依据，专门查阅了从 1981 年版（JTJ 1—1981）到 2003 年版（JTG B01—2003）的《公路工程技术标准》，但该技术标准并没有对公路隧道洞口的形状做出专门的规定。于是，笔者调查了北京地区相关的各种公路隧道，图 4.32、图 4.33 和图 4.34 为通过调查获得的各种大小的隧道洞口图片。

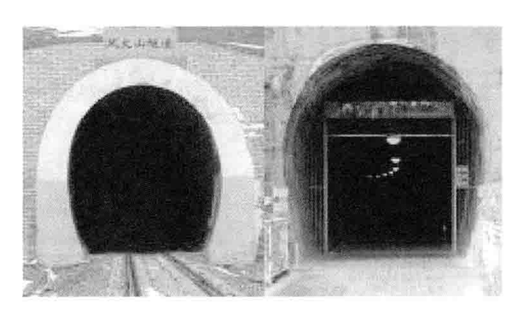


图 4.32　小型隧道洞口（隧道洞口宽度在 3 m 以内）

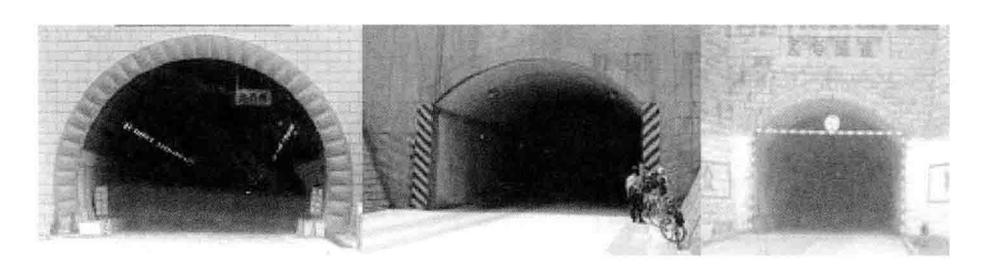


图 4.33　中型隧道洞口（隧道洞口宽度在 10 m 以内）



图 4.34　大型隧道洞口（隧道洞口宽度在 10 m 以上）

经过对公路隧道洞口的结构特点研究与目标特征分析，发现上述公路隧道洞口具备如下特征：

① 洞口底部为平坦的路面，因而洞口底部在断面形状上呈现为一条直线。

② 洞口顶部为圆弧形拱顶，该圆弧形拱顶与隧道侧壁相交，因而在洞口断面形状上呈现为“弧线+直线”的封闭图形。

③ 洞口断面形状可能呈现为一条或两条直线与圆弧形拱顶相交的情况（图 4.35）。其中，当洞口断面形状呈现为一条直线与圆弧拱顶相交时，说明该洞口断面形状为抛物线形，其与地面直线相交构成一封闭图形，交点有两个；当洞口断面形状呈现为两条直线与圆弧拱顶相交时，说明该洞口断面形状为“圆弧+矩形”，与两侧直线（隧道侧壁）相交，两侧直线又与地面直线相交，共同构成一封闭图形。

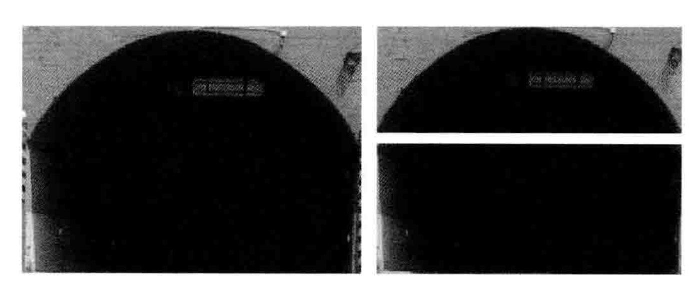


图 4.35 隧道洞口轮廓分解示意图

于是，公路隧道的洞口轮廓大致可以分为“矩形+圆弧”形和“圆弧”形两类，其外观结构可抽象为由直线段和圆弧线段组成，且直线段与圆弧线段之间形成一个存在公共交点的封闭图形，其图形特征如图 4.36 所示。

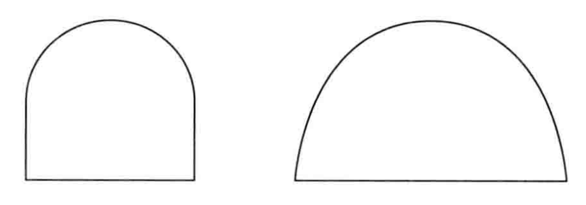


图 4.36 隧道洞口的外形

通过调查还发现，较小的公路隧道其洞口形状多为椭圆形，中型隧道洞口多为圆弧形，部分为“圆弧形+矩形”，而大型隧道洞口往往为部分圆弧形。主要原因是为了提高隧道的强度。当公路隧道的断面形状为上述形状时，结构稳定，应力分散，能更好地起到支撑和抗压作用。

4.3.2 洞库类目标样本建模

1. 样本的基本概念

所谓样本，是按照一定的抽样规则从总体中取出的一部分个体。对于人类来说，外界客观事物在大脑中是以样本的形式表示的。样本是事物在大脑中的符号，与人脑功能密切相关，人脑的主要功能就是存储样本并对样本进行分析。

人类对外部客观事物的意识、建立样本、联结都是后天建立的。初生婴儿既不能认识客观事物，也不能进行行为活动，需要通过学习来逐渐建立代表客观事物的样本，样本的建立是婴儿在与外界环境的不断接触中慢慢形成的，婴儿接触什么样的客观事物就会建立什么样的样本。样本的建立过程遵循着中心扩散规律，从无到有、从简单到复杂、从低级到高级逐步形成。

样本是人脑分析的工具，建立样本的目的就是将其用于分析事物。人类大脑、下丘脑、杏仁核、纹状体、小脑均是样本的存储结构，又是样本的分析结构，大脑、下丘脑、纹状体是主要的分析结构，称为分析中心。当人们看到或听到外界事物时，分析中心使用已经建立的样本分析事物，获得一个与该事物相符的样本并予以激活，激活的样本点亮丘觉产生意识。样本的分析过程也同样遵循着中心扩散规律，由简单到复杂，对事物的意识也由简单到复杂发展。

为了提高探测子系统目标识别的正确率，必须建立类型丰富、数量众多、参考价值高、应用水平好的样本库，并遵循从无到有、从简单到复杂的发展模式，通过对样本的分析研究来提高智能作战机器人探测子系统的性能水平。

2. 样本的主要特点

对于探测子系统来说，建立洞库类目标的样本库能够为目标识别提供信息支持和技术帮助，缩短目标识别的时间，提高目标识别的效率。但在现实条件下，对军用洞库类目标进行样本采集还存在许多困难，即便是对公路隧道进行样本采集，也存在着若干不便，因而决定采用计算机虚拟现实技术来建立洞库类目标的仿真样本库。创建仿真样本库具有如下优点：

① 减轻实地采集目标样本的工作量。

为了提高对特定目标的正确识别率，人们往往要付出很多的时间和精力来采集样本。例如，作为军用洞库模拟参照物的公路隧道均离市中心较远，调查时需驱车前往，往返时间约为 4 h，而且实地拍摄时靠近公路，来往车辆对人身财产安全构成一定威胁。此外，样本的采集应当是分季节、分天时、分距离、分角度进行的，这样在实际采集时存在极大困难。若能通过计算机软件模拟造型的方法，在考虑各种影响因素的条件下，尽量真实、准确、科学地模拟出目标特征，使之构成形态逼真、类型丰富、数量众多、特征信息全、参考价值高、应用水平好的仿真样本库，不但可以减少或减轻实地采样的工作量，还能获得更加丰富完善的模拟参照物。

② 提高识别算法的准确率。

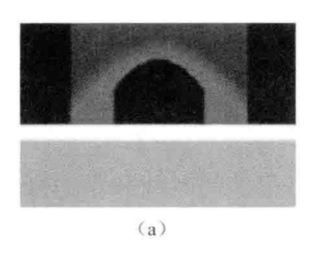
通过计算机软件模拟造型的方法，可仿真造型出大量的目标样本。由于这些仿真样本的环境参数、位置参数在计算机系统中可以根据目标识别的需要任意修改，能够进一步完善相关识别算法的性能水平，可明显提高智能作战机器人探测子系统的目标识别准确率。

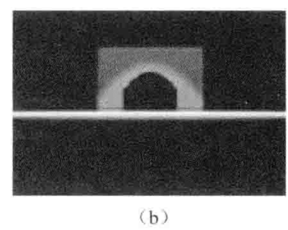
③ 丰富和完善目标信息。

当目标特征信息不充足或不完备时，模糊智能识别算法就能够显现出其特有的优势。比如，仅仅拥有一张目标的照片，而没有目标的具体参数时，使用神经网络识别算法的机器视觉系统是无法有效工作的，因为神经网络识别算法必须从一张照片中获得足够的信息来训练和修正其中的参数。对于承担着对敌洞库类目标实施打击、封锁等作战使命的智能作战机器人来说，如果能通过三维建模仿真的方法，建立目标的实体模型，完善目标特征信息，让其尽可能接近真实情况，再从不同角度、不同距离对造型实体进行采样并构成相应的样本库，此后，使用库中的不同样本，就可以完善神经网络的相关参数，提高神经网络识别算法的识别效率。

4.3.3　仿真样本库的建立

在对北京市门头沟区的“东方红隧道”等样本做实地测量的基础上，通过计算机实体造型软件 Solidworks 建立洞口样本模型，再通过 3ds max 软件修正模型参数、添加光源、渲染材质，最后架设摄像机对目标进行了采样。所选洞口为“东方红隧道”的入口，经实地测量得知，洞口宽度为 810 cm。采集图像后，根据图中比例关系算出，洞口高 640 cm，两侧直线门边长 360 cm，洞顶为椭圆的一部分。采用焦距为 43 mm、视场角为 45°的镜头，在隧道入口正前方、30°、45°、60°方位角处，分别在距隧道入口 30 m、50 m、80 m 进行采样，所得结果分别如图 4.37～图 4.40 所示。


(a)


(b)

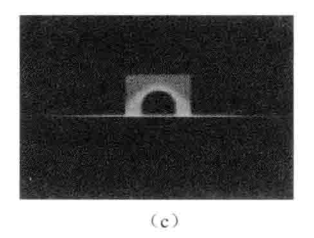
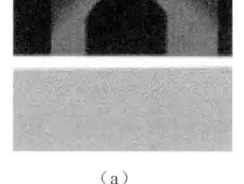
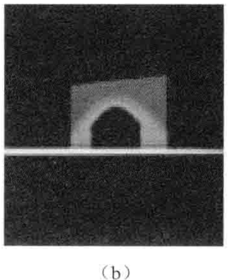

(c)

图 4.37　隧道正前方采样结果

(a) 30 m；(b) 50 m；(c) 80 m


(a)


(b)

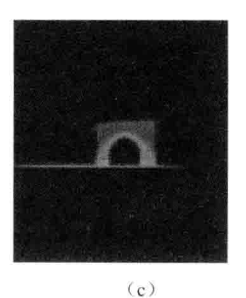

(c)

图 4.38　隧道前方 30°方位处采样结果

(a) 30 m；(b) 50 m；(c) 80 m

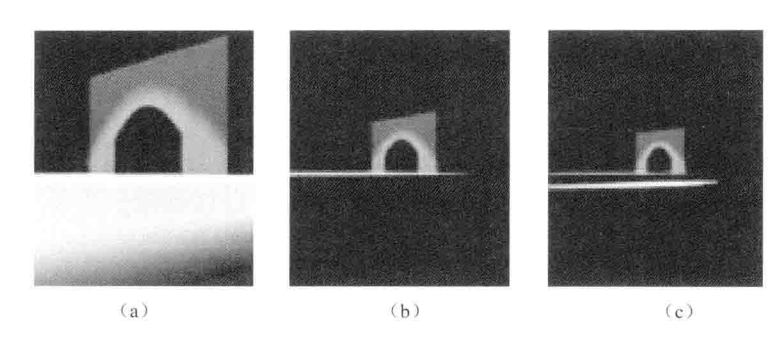


图 4.39　隧道前方 45°方位处采样结果

(a) 30 m；(b) 50 m；(c) 80 m

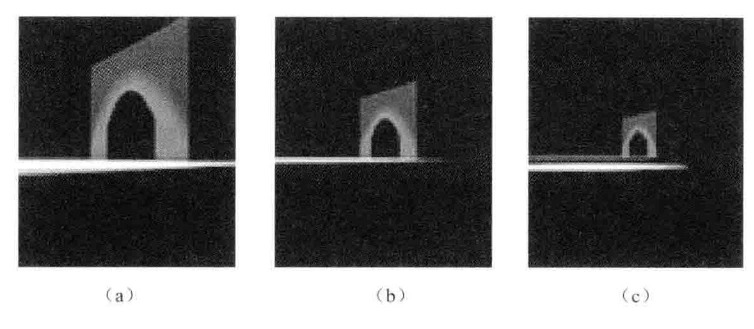


图 4.40　隧道前方 60°方位处采样结果

(a) 30 m；(b) 50 m；(c) 80 m

以洞库类目标的特征分析与样本建模为主要研究内容进行了长达数年的系统研究和深入探索。为了能够在复杂山体背景条件下将敌洞库类目标正确识别出来，从“特征简单，便于提取”和“特征稳定，便于识别”的目标特征两要素出发，选择军用洞库的形状作为目标特征量。由于军用洞库的形状可抽象成“直线与直线”或“直线与弧线”的不同组合，这些组合既简单，又明了，符合目标特征提取的相关要求，因此，这种选择非常科学合理，可为智能作战机器人探测子系统准确辨认敌洞库目标及其方位创造条件，并能显著缩短识别时间，大幅提高识别效率。

4.4　洞库目标图像预处理的理论研究与技术探索

在智能作战机器人遂行作战任务时，其探测子系统在对洞库类目标进行识别之前，需要对视觉传感器采集的图像进行预处理。通过预处理去除有害噪声以及妨碍目标识别的其他信息，使探测子系统能够更好地进行目标识别。因此，图像预处理的理论研究与技术探索具有十分重要的意义，是智能作战机器人探测子系统提高目标正确识别率不可缺少的基础性环节。

4.4.1 探测子系统工作层次与作业流程

1. 探测子系统工作层次

在机器视觉领域，一个完整的图像分析系统其工作应当包含 3 个层次，即图像处理、图像分析和图像理解，这 3 个层次之间的关系如图 4.41 所示。

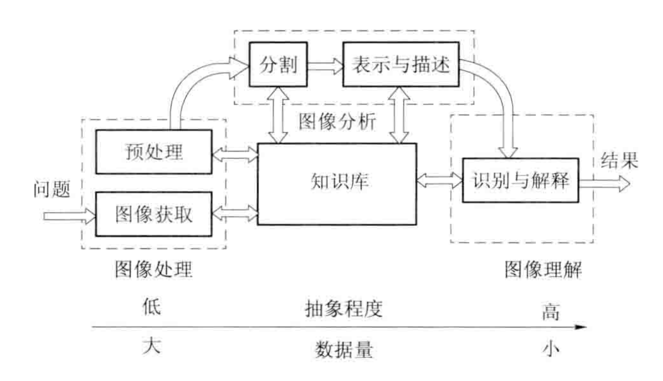


图 4.41 图像分析系统工作层次的基本关系

在图 4.41 中，图像处理主要是指图像的预处理，是对系统获取的二维图像进行降噪、增强、二值化等技术处理。图像分析主要是指图像的分割，是把景物从图像中提取出来，常用的方法有灰度阈值法、颜色分割和边缘检测。图像理解主要是指图像的模式识别，图像经过分割和描述，提取有效的特征，对物体进行辨认而完成某些特定的任务。例如，机器视觉系统要从许许多多形状各异的物体中寻找某种具有特定形状的物体，就需要将图像进行区别和分类，从而筛选出目标物，这就是图像的模式识别。

由此可见，一幅图像的处理流程需要经过图像预处理、图像分割和图像识别几个步骤。具体实施过程中，根据需要，可能包括图像增强、数据编码和传输、平滑、边缘锐化、分割、特征抽取、图像识别与理解等内容。经过这些处理后，既改善了图像的视觉效果，又便于计算机对图像进行分析、处理和识别。

智能作战机器人探测子系统承担着将敌洞库类目标从山体复杂背景条件下区分、识别出来的艰巨任务，其工作层次也应按图 4.41 所示关系结构进行设置，这样才能充分保障该子系统具有正确识别敌洞库类目标的能力，为有效遂行打击和封锁敌洞库类目标的作战使命创造条件。

2. 探测子系统作业流程

在进行智能作战机器人探测子系统软件设计与功能集成之前，必须先根据其工作层次关系来明确子系统的作业流程，规划子系统软硬件功能，使子系统的硬件平台有具体的分工以及确定的任务，进而充分发挥系统软件的特长，高质量、高效率地实现子系统规定的图像采集与目标识别功能。

由应用背景和作战使命可知，智能作战机器人探测子系统的作业流程可按图 4.42

进行设置：

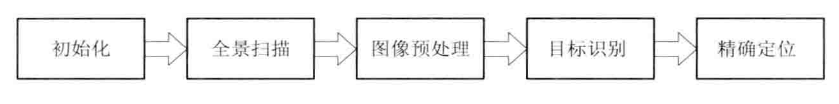


图 4.42　探测子系统作业流程

该作业流程的具体内容如下：

① 初始化。对探测子系统硬件平台的各个组成部分进行初始化。

② 全景扫描。智能作战机器人的控制子系统控制运动云台实现绕云台垂直轴的水平转动和绕云台水平轴的俯仰摆动，使云台上装置的 VCM50 可见光/红外线智能探测器做有序运动，对智能作战机器人周围景物进行分层、分段图像采集，云台每转若干角度，VCM50 就拍摄一幅图像，并记录下该图像和其对应的方位，校正畸变后，将所得图像进行全景拼接，得到周围环境的总体信息，实现对周围景物的全景扫描。

③ 图像预处理。对全景拼接后的图像进行必要的转化、增强等处理，滤除冗余信息，进行边缘提取。

④ 目标识别。分析全景图像，看其中是否有疑似目标，若有，则进一步分析其真实程度及具体个数，找出其中最真实的目标，分析其位置、距离等具体参数。

⑤ 精确定位。根据分析得到的结果，找到目标在图像中的具体位置，根据全景扫描时记录下来的图像方位信息，给出目标在实际环境中的精确位置，并将相关信息传送给控制子系统，为控制子系统遂行后续任务提供依据。

⑥ 如果没有找到目标，则重复上述各步骤，直到找到目标或超出寻找次数。此时发送信息给控制子系统，由控制子系统决定下一步行动。

以上作业流程的程序框图如图 4.43 所示。

4.4.2　探测子系统全景图像拼接

1. 基于序列图像的全景图像拼接

图像拼接技术是由于摄像器材的视角限制，无法一次拍出视场广阔的图片而产生的，它是将一系列具有部分重叠的图像进行无缝拼接而得到超宽视角图像的技术。图像拼接的主要工作是确定相邻图像在宽度、高度上的重叠程度，找到匹配点。目前国内外图像匹配算法主要可分为三类：一是基于频域的（相位相关度方法）Fourier 变换位移理论；二是基于像素灰度级的方法；三是基于特征的方法。方法一的缺点是重叠率低于50%便无法实现匹配；方法三依赖于图像特征，需手动提取，会带来很大误差；而基于像素灰度级的匹配算法非常适合灰度图像的拼接，目前主要有比值法、块匹配法、模板匹配法。其中，比值法虽然简单易行，但遇到比值模板中出现黑色像素点时，此法就会失效。模板匹配法虽能准确找到匹配点，但计算量较大。实际应用时，人们往往会采用两种算法结合的方法来实现灰度图像拼接。

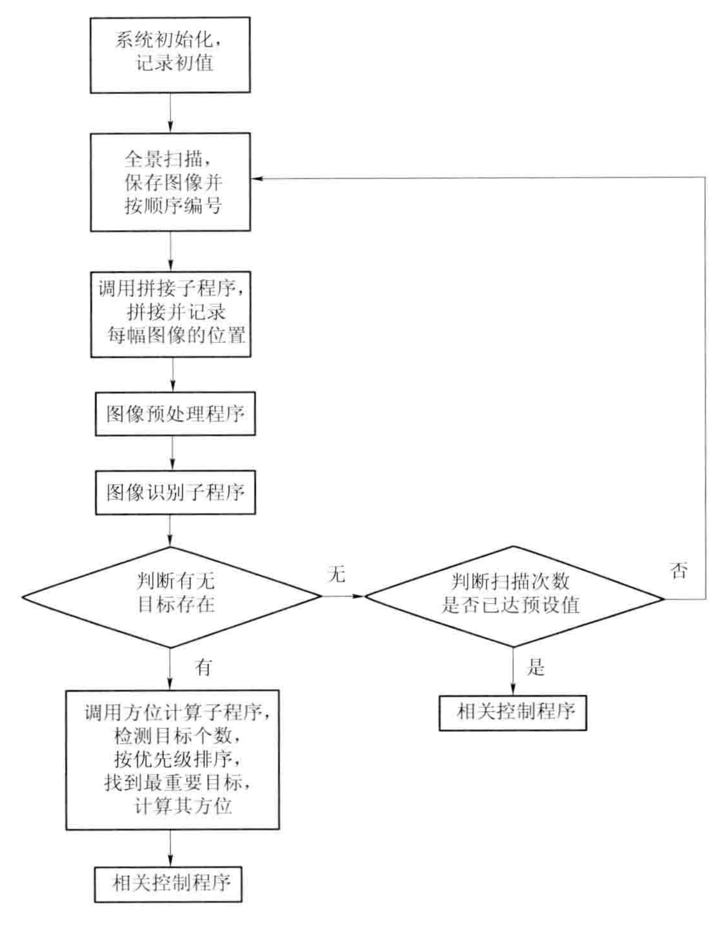


图 4.43　探测子系统作业流程程序框图

基于图像建模和绘制的虚拟环境构造是近年来虚拟现实技术研究的热点。其中基于序列图像的全景图像拼接技术研究是虚拟环境临场感的一个关键因素，国内外许多学者纷纷以普通照相机拍摄的序列图像为基础，通过相邻两幅序列图像差值图像极值点的搜寻，快速提取两幅序列图像之间的重叠部分，并采用线性加权法使得缝合后的图像显得画面自然、效果逼真，最后通过基于序列图像的全景图像拼接方法在普通 PC 机予以实现。

全景图像拼接是利用照相机平移或旋转得到的部分重叠图像样本生成一个较大的甚至左右对接的全方位图像的场景绘制方法。图像拼接的主要问题是如何处理相邻两个图像样本之间的重叠部分，Mc Milliams 和 Bishop 等人提出的全景图拼接算法，依据摄像机绕垂直轴旋转 360°时所拍摄的序列图像求解摄像机参数，进行全景图的拼接，该算法对相邻图像帧间摄像机的转动角度有严格的限制，要求相邻图像帧间有 2/3 以上的重叠。Apple 公司开发的 Quick Time VR 系统是用 IBMR 技术构建全景环境最成功的商

业软件，但该系统需要昂贵的摄影器材和复杂的摄像机校准工作。

基于序列图像的全景图拼接算法，在保持照相机绕垂直轴均匀旋转的前提下，当相邻图像序列有 1/5～1/10 重叠时，就能实现自动拼接。该算法以普通照相机拍摄的序列图像为基础，根据相邻两幅图像中特征区域像素灰度差值极小的原理，确定两幅图像重叠区域的匹配关系；综合考虑图像自然度和缝合速度两个方面的因素，实施重叠区域图像淡入淡出的自然缝合算法。实验结果表明，该算法能够实现序列图像的全自动匹配和缝合，拼接效果较为理想，能满足智能作战机器人探测子系统对周围景物的全景图像拼接要求。

2. 基于 IBMR 的全景图像生成

用 IBMR 方法构建虚拟环境场景时，其图像样本可以来自普通的照相机、全景照相机或由计算机绘制。对于不同类型的图像输入，全景图生成的方法也有所差异。全景图生成是构建基于图像绘制虚拟现实系统的关键，根据图像投影方式的不同，全景图一般可以分为立方体形、圆柱形和球形三种模式。不同的全景图模式，其获取的难易程度和控制的难易程度都有很大不同，目前普遍采用圆柱面投影方式。全景图的生成有三种途径：

① 计算机绘制。该方法利用计算机图形学技术建立场景模型，并绘制虚拟环境的全景图。绘制全景图过程不需要实时控制，因而可以绘制出比较复杂的场景和采用真实感较强的光照模型。其优点是可以十分容易地得到任意形状的全景图且不需要任何附加步骤，缺点是建模相当费时和烦琐。

② 全景照相机拍摄。该方法的优点是不需要进行复杂的建模就能得到虚拟环境的全景图，缺点是需要昂贵的专用设备。

③ 普通照相机拍摄。该方法是由普通照相机拍摄一系列相互重叠的环境照片，对图像样本（序列）进行透视变换、图像拼合、图像变形、图像合成及裁剪，最后将它们拼接成一幅全景图。其优点是可以做成任何形状的全景图且不需要专用的设备；另外，还可以对每幅照片进行曝光控制，得到光强分布比较平衡的全景图。此方法的关键是如何能够制造出一个很好的无缝拼接工具。

3. 全景图像拼接

图像拼接的具体实现过程如图 4.44 所示。

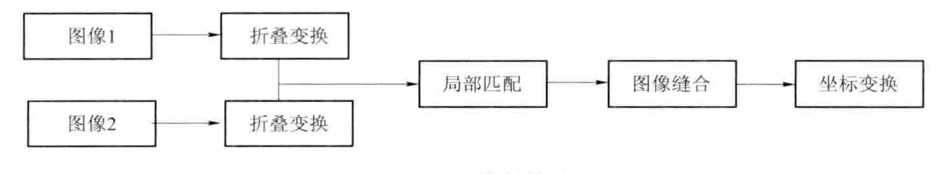


图 4.44　图像拼接流程

对于采用普通照相机拍摄的一系列相互重叠的环境照片，拼接成一幅全景图要经过图像透视变换、图像拼接、图像变形及图像合成等步骤。图像拼接要解决的关键问题是

对相邻两幅图像样本之间重叠部分的处理。因照相机在拍摄序列照片过程中镜头角度会存在差异，在进行图像匹配和拼接之前，必须对其进行相应的折叠变换，使两幅图像统一到相同的图像空间，经折叠变换之后的两幅图像就可以进行图像重叠区域的匹配和缝合了。

（1）基于差值图像极值匹配

具有重叠区域的两幅图像，其重叠范围的确定主要是基于相邻两幅图像重叠部分对应像素的相似性。目前常用基于面积的算法来进行处理，即取前一幅图像中的某一区域作为模板，在第二幅图像中搜索具有相同（或相似）值的对应区域，从而确定两幅图像的重叠范围。但是这种算法计算量太大，且易受光照条件的影响，往往不能满足实用性要求。也有学者提出从第一幅图像的重叠区域中取相互平行的两列的上部分像素，用它们的比值作为模板，在第二幅图像中由左至右依次从间距相同的两列上取出部分像素，并逐一计算其对应像素值的比值，然后将这些比值依次与模板进行比较，其最小差值对应的列就是最佳匹配。运用 Multi-masks 方法将多个图像的选定区域同时融合在一起，并利用小波变换对图像进行多分辨分解，采用与频段宽度成正比的加权拼接宽度来消除拼缝的影响。

遗憾的是，上述算法在实施过程中常常陷入匹配模块的局部最优，导致图像拼接失败。基于差值图像的极值点搜寻，采用了一种新的重叠区域的搜寻方法，它可以方便地提取两幅图像之间的重叠部分，其差值图像匹配原理如图 4.45 所示。其中，图像 1 的右端和图像 2 的左端具有如图 4.45 所示的重叠区域，算法设定了一个指针 λ 来确定图像的计算区域。λ 从图像 1 右端开始向左移动，相应 λ 从图像 2 左端向右移动，由 λ 所决定的区域为计算区域。图像 1 和图像 2 在计算区域内的差值图像的相似度差值函数定义为：

$$J = \sum |H_1(i,j) - H_2(k,l)| \tag{4.1}$$

其中，i，j，k，l 分别属于图像 1 和图像 2 计算范围内的像素坐标；$H_1(i,j)$ 和 $H_2(k,l)$ 是计算区域内的像素点灰度值。

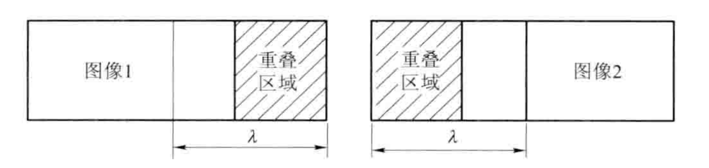


图 4.45 差值图像匹配原理示意图

相似度差值函数随变量 λ 的变化曲线如图 4.46 所示。在 $\lambda=\lambda_m$ 处达到极小值，这样问题就简化为寻找 λ_m。在图像的纵向上同样可以进行类似的搜索，以寻找到满足匹配条件的最优匹配。实验表明，该算法能精确地找到两幅相互重叠图像的匹配点（精度上不超过 1 个像素），并且只需进行加减法运算，通过选取合适的 λ，其收敛速率很快。

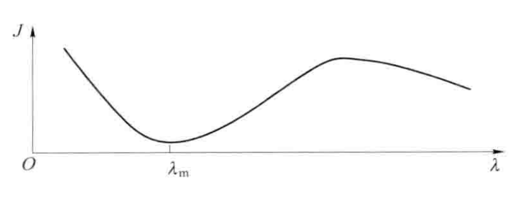


图 4.46　相似度差值函数分布曲线

（2）重叠图像的自然缝合

在找到两幅图像中的重叠区域之后，如何通过图像缝合算法，使得由两幅图像拼接而成的一幅图像没有明显（人眼能观察到）的接缝是图像缝合算法研究的重点。通过对图像自然度和缝合速度两个方面的综合研究，在重叠图像区域采用线性加权淡入淡出的自然缝合算法。照片 1、2 中图像重叠部分的像素值加权系数满足图 4.47 中的线性关系，即照片 1 中重叠图像像素的权值变化为 1→0，同理，照片 2 中重叠图像像素的权值变化为 0→1，这样就实现了图像的自然拼接，达到淡入淡出的效果。当多幅照片的图像进行缝合时，将缝合好的图像作为照片 1 的图像，继续上述算法，直至完成所有照片的拼接。

4. **全景图像拼接的实验结果**

智能作战机器人图像采集的质量主要依赖于所用摄像头（图 4.48），其相关资料可见表 4.3，利用开关可以让该摄像头工作在普通模式和红外模式。

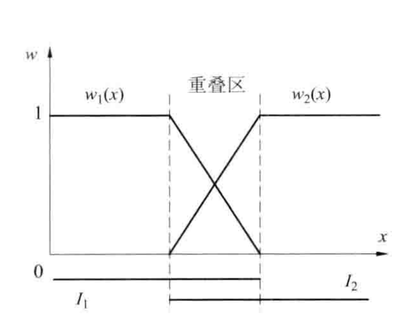


图 4.47　图像缝合加权函数



图 4.48　拍摄照片所用数字式摄像头

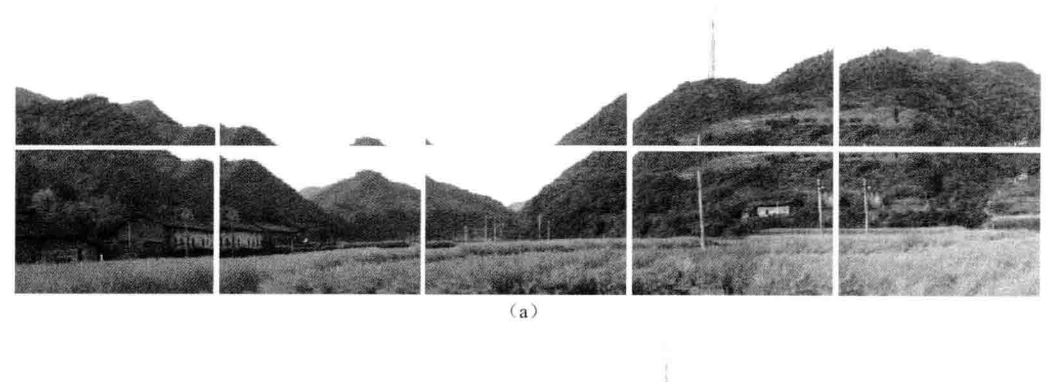
表 4.3　数字式摄像头相关资料

名　　称	规格或数值
视频信号	PAL 制式（用于亚洲）
总像素数	PAL：400 000 有效像素
同步	内部
水平分辨率	PAL：420TV lines
垂直分辨率	350TV lines
信噪比	48 dB
扫描法	2∶1 隔行扫描

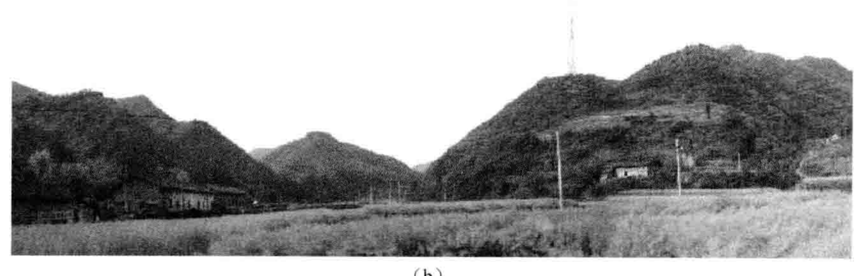
续表

名　　称	规格或数值
最低照度	正常模式：1 lux（at 1/30 sec.）/夜间模式：0 lux
图像模式	正常模式，夜间模式
对焦	自动/手动：1.6 m to inf；夜间模式：2.3 m to inf
最大功率损耗	大约 12.5 W
操作环境	工作温度：0 ℃～40 ℃；湿度：20%～85% RH
尺寸/mm	33（*W*）×33（*H*）×32（*D*）

验证实验利用图 4.48 所示数字式摄像头和带刻度的三脚架对北京近郊一自然山地景况进行了大视场图像的拍摄。按照拍摄的图像序列进行了自动拼接。虽然拍摄过程中不可避免会出现一定的偏差，但在图景拼接过程中能够自动地进行匹配，相应算法采用 VC++编写，在 PC（CPU 为 2.4 GHz，内存为 1 GB，独立显存为 512 MB）机上运行，拼接速度较快（每两幅图像拼接时间为 2～3 s），没有明显的拼接痕迹。全景图像拼接效果如图 4.49 所示。



(a)



(b)

图 4.49　图像全景拼接示例

(a) 沿俯仰摆动方向和水平转动方向分幅拍摄的景物照片；

(b) 经全景拼接而成的景物照片

4.4.3　图像预处理的理论研究与技术探索

1. 图像的基本概念

所谓图像，就是视觉景物的某种形式的表示和记录。人们都十分熟悉黑白或彩色照片，黑白照片记录了景物中每点的亮度，彩色照片则不仅记录了景物的亮度，还记录了景物的颜色。一幅平面图像所包含的信息首先表现为光的强度，它是随空间坐标(x,y)、光线的波长u和时间t变化的，因此，图像函数可以表示为：$I=(x,y,u,t)$。若只考虑光的能量而不考虑光的波长，在视觉效果上图像只有黑白深浅之分，而无色彩变化，这时称为黑白图像或灰度图像，则图像模型可以表示为：$I=f(x,y,t)$。当图像内容不随时间变化时，称为静止图像。对灰度图像而言，其函数为：$I=f(x,y)$。本节图像预处理和图像识别算法主要以静止图像$f(x,y)$为基础进行讨论。

灰度图像中各个像素所具有的明暗程度由灰度值所标识。一般而言，白色的灰度值定义为 255，黑色的灰度值定义为 0，而由黑到白之间的明暗度则被均匀地划分为 256 个等级。对于 256 色位图，一个字节刚好可以表示 1 个像素。一幅$M\times N$的图像，M表示每行（横向）的像素个数，N表示每列（纵向）的像素个数，数字图像的矩阵表示如图 4.50 所示。

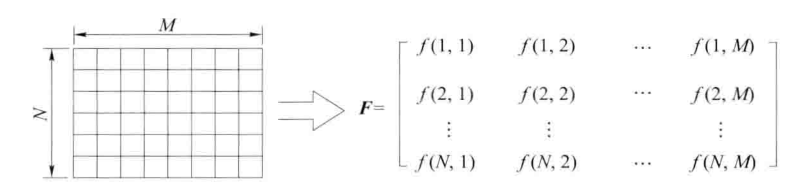


图 4.50　数字图像的矩阵表示

2. 图像预处理的基本方法

（1）图像变换

图像变换是为了达到某种目的，而将原始图像变换映射到另一个空间上，使得图像的某些特征得以突出，以便于后面的处理和识别。一般情况下，变换后的图像，大部分能量都分布于低频谱段，这对以后图像的压缩、传输都比较有利。

常用的图像变换方法有傅立叶变换法、离散余弦变换法、沃尔什-哈达玛变换和霍特林变换法等。

傅里叶变换（DFT）是一种特殊的积分变换，它能将满足一定条件的某个函数表示成正弦基函数的线性组合或者积分。在应用领域，傅立叶变换是信号频谱分析中常用的一个工具，它把一些复杂的信号分解为无穷多个相互之间具有一定关系的正弦信号之和，并通过对各个正弦信号的研究来了解复杂信号的频率成分和幅值。

离散余弦变换（DCT）是与傅里叶变换相关的一种变换，它类似于离散傅里叶变换，但是其虚部为零，只使用实数。

沃尔什－哈达玛变换本质上是将离散序列 $f(x)$的各项值的符号按一定规律改变后，再进行加减运算，它比采用复数运算的 DFT 和采用余弦运算的 DCT 要简单得多。

霍特林变换也常称为特征值变换、主分量变换或离散 KL 变换，它的变换核矩与图像的统计特性有关，是一种最佳变换，常用来衡量其他变换的性能。

（2）图像增强

图像增强是指按特定的需要突出一幅图像中的某些信息，同时削弱或去除某些不需要的信息的处理方法。图像增强是图像预处理中的重要内容之一，在图像生成、传输或变换的过程中，由于多种因素的影响，造成图像质量下降、图像模糊、特征淹没等现象，给分析和识别带来困难。因此，按特定的需要将图像中人们感兴趣的特征有选择地突出，衰减不需要的特征，提高图像的可识别性，是图像增强的主要内容。应当注意的是，图像增强不考虑图像降质的原因，而且改善后的图像也不一定逼近原图像，这使它与图像复原存在本质上的区别。

图像增强的主要目的有两个：一是改善图像的视觉效果，提高图像的清晰度；二是将图像转换成一种更适合人类或机器进行分析处理的形式，以便从图像中获取更多有用的信息。

由图 4.51 可知，图像增强的方法包含两大类：一类是空间域处理法，另一类是频率域处理法。空间域法是直接对图像的像素进行空间上的处理，基本是以灰度映射变换为基础的，所用的映射变换取决于图像的特点和增强的目的，主要包括图像灰度修正、图像平滑处理和图像锐化处理等。频率域法是在图像的某种变换域内，对变换后的系数进行运算，然后再反变换到原来的空间域得到增强的图像，主要包括低通滤波、高通滤波、带阻滤波、同态滤波等。

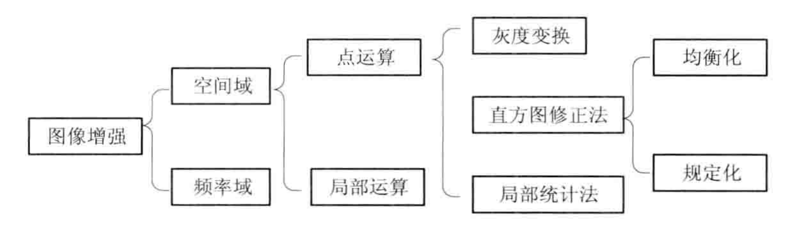


图 4.51 图像增强主要方法方框图

在智能作战机器人探测子系统中，空间域的处理方法已经能够满足洞库类目标识别的需要，因此将对空间域图像增强方法展开重点研究。

1）直方图增强

如果将图像中像素的亮度（灰度级别）看成一个随机变量，则其分布情况就反映了图像的统计特性，这可表现为灰度直方图。灰度直方图是灰度级的函数，它表示图像中具有某种灰度级的像素的个数，反映了图像中每种灰度出现的频率。灰度直方图是一个离散函数，其横坐标是灰度级，纵坐标是该灰度级出现的频度，它是图像最基本的统计

特征，反映了每一灰度与其出现概率间的统计关系。

对于一幅数字图像 $f(x,y)$ 来说，其像素总数为 N，用 r_k 表示第 k 个灰度级对应的灰度，n_k 表示具有灰度 r_k 的像素的个数。用横坐标表示灰度级，纵坐标表示频数，则直方图可以定义为：

$$P(r_k) = \frac{n_k}{N} \tag{4.2}$$

式中，$P(r_k)$ 表示灰度 r_k 出现的相对频数。表示为直方图的形式如图 4.52 所示。

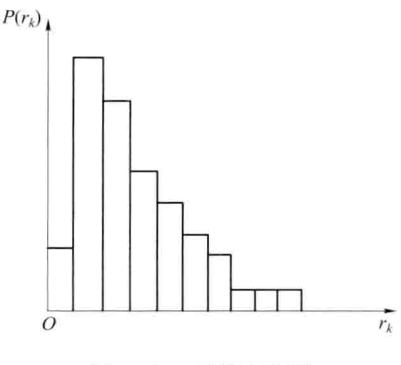


图 4.52　图像直方图

由定义可知直方图有如下性质：

① 直方图是一幅图像中各像素灰度值出现次数的统计结果，它只反映该图像中不同灰度值出现的次数，而未反映某一灰度值像素所在位置。也就是说，直方图只包含了该图像中某一灰度值的像素出现的概率，而丢失了其所在位置的信息。

② 任一幅图像，都能唯一地确定出一幅与它对应的直方图，但不同的图像，可能有相同的直方图。也就是说，图像与直方图之间是多对一的映射关系。

③ 由于直方图是对具有相同灰度值的像素统计得到的，因此，一幅图像各子区的直方图之和就等于该图像全图的直方图。

直方图能够反映数字图像的概貌性描述，例如图像的灰度范围、灰度分布、整幅图像的平均亮度和明暗对比度等，并可由此得出进一步处理的重要依据。但直方图与图像并非一一对应关系，不能完整地描述一幅图像。

2）直方图修正方法

一幅均匀量化的自然图像的灰度直方图通常在低灰度区域上的频率较大，这样的图像较暗，区域中的细节常常看不清楚。为使图像变得清晰可见，需要使图像的灰度动态范围变大，并且让频率小的灰度级经过变换后其频率变得大一些，即将变换后的图像灰度直方图在较大的动态范围内趋于均衡，这就是所谓的直方图修正方法。

采用直方图修正后，可使图像的灰度间距拉开或者使灰度分布均匀，从而增大了反差，使图像细节清晰，达到图像增强的目的。直方图修正技术通常有直方图均衡化和直方图规定化两类。所谓直方图均衡化，也称灰度均衡化，目的是通过点运算使输入图像的灰度分布较为均匀。图像概率密度函数（归一化到单位面积的直方图）可定义为：

$$P(x)=\frac{1}{A_0}\cdot H(x) \tag{4.3}$$

其中，$H(x)$ 为直方图；A_0 为图像的面积。

设转换前图像的概率密度函数为 $P_r(r)$，转换后图像的概率密度函数为 $P_s(s)$，转换函数为 $s=f(r)$。由概率论知识可得：

$$P_s(s)=P_r(r)\cdot\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}s} \tag{4.4}$$

这样，如果想使转换后图像的概率密度函数为 1（即均衡化的直方图），则必须满足：

$$P_r(r)=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}r} \tag{4.5}$$

等式两边对 r 积分，可得：

$$s=f(r)=\int_0^r P\cdot r(u)\mathrm{d}u=\frac{1}{A_0}\int_0^r H(u)\mathrm{d}u \tag{4.6}$$

该公式称为图像的累积分布函数。

上面的公式是被归一化后导出的，对于没有归一化的情况，只要乘以最大灰度值（对于灰度图，就是 255）即可。灰度均衡的转换公式为：

$$D_{\mathrm{B}}=f(D_{\mathrm{A}})=\frac{D_{\max}}{A_0}\int_0^{D_{\mathrm{A}}} H(u)\mathrm{d}u \tag{4.7}$$

对于离散图像，转换公式为：

$$D_{\mathrm{B}}=f(D_{\mathrm{A}})=\frac{D_{\max}}{A_0}\sum_{i=0}^{D_{\mathrm{A}}} H_i \tag{4.8}$$

式中，H_i 为第 i 级灰度的像素个数。

图 4.53 为一公路隧道的灰度图像，图 4.54 为该隧道灰度图像的直方图。

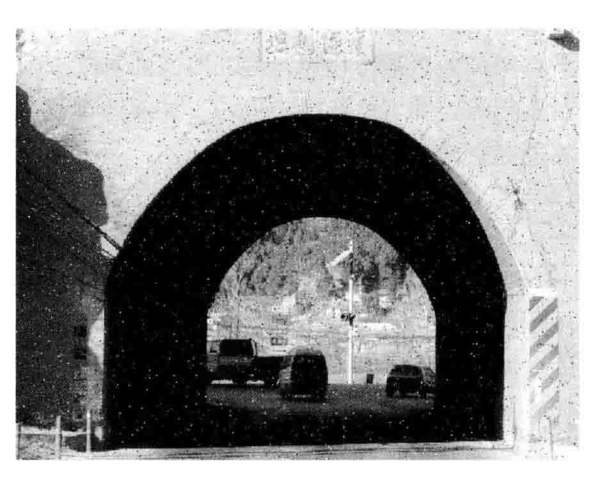


图 4.53 某公路隧道的灰度图像

从图 4.54 可以看出，该公路隧道图像的灰度值大部分集中在 220 左右，在其他灰度值处分布很少，因而图像整体偏亮。造成图像偏亮的原因可能是拍照时曝光时间设置的影响，或者是拍照时光线照射角度的影响。利用直方图均衡化方法可以让图像的直方图在 0～255 之间均匀分布，消除图像偏亮的不利影响，在一定程度上改善图像的质量。图 4.55 是图 4.54 的直方图经均衡化处理后的直方图，从图 4.55 可以看出，此时直方

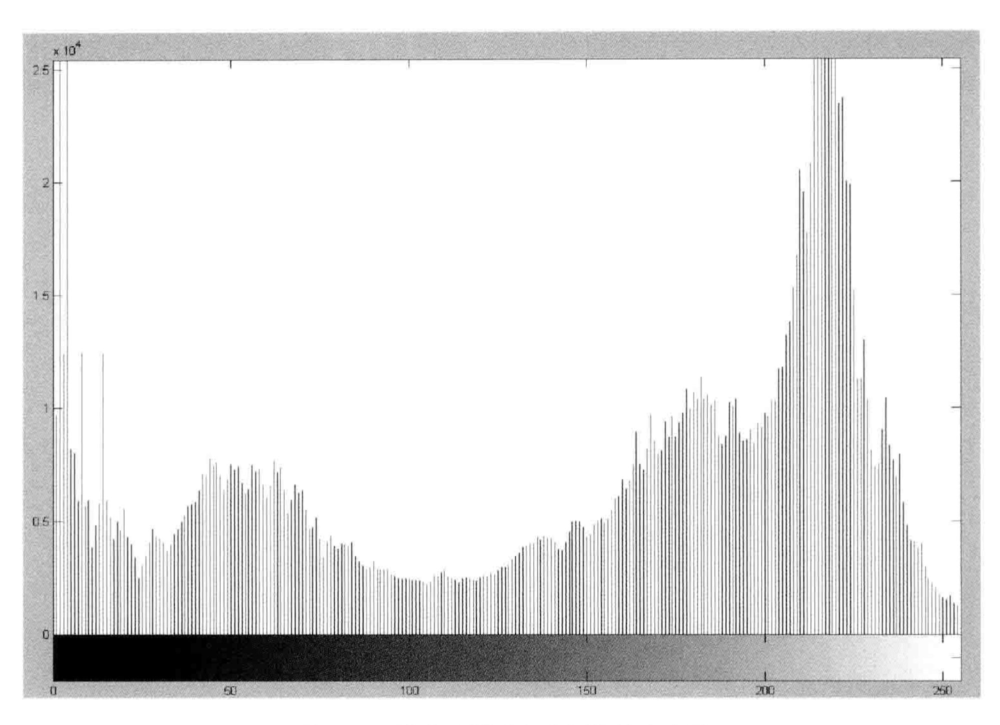


图 4.54　该公路隧道灰度图像的直方图

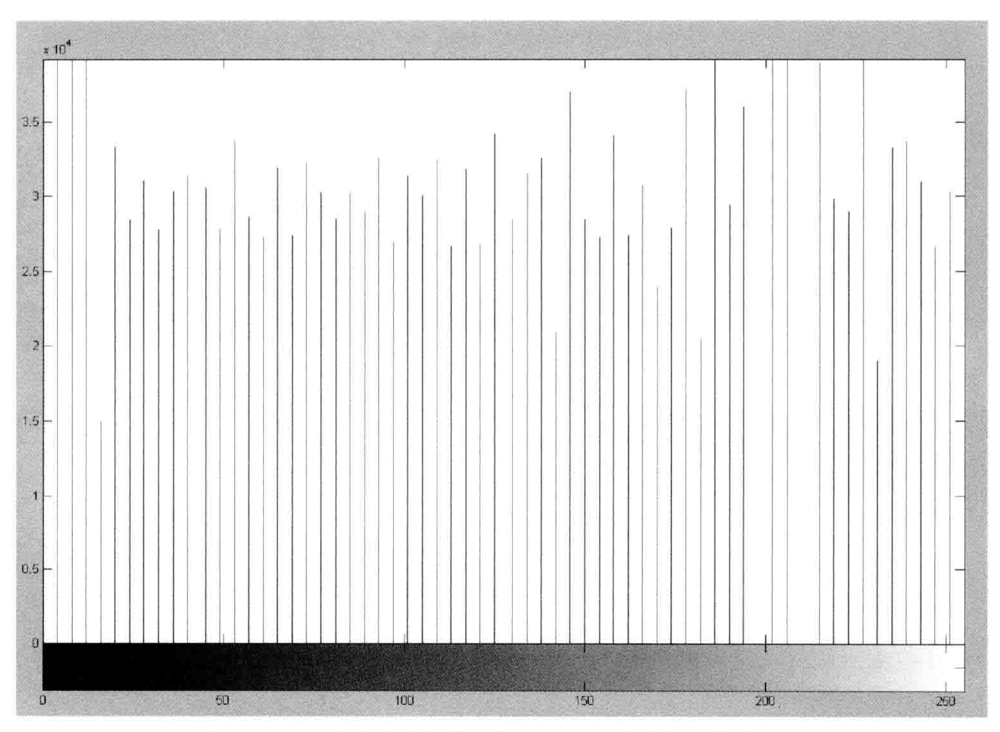


图 4.55　该公路隧道灰度图像经直方图均衡化后的直方图

图分布比较均匀，在各个灰度值处均有分布，图像正常。图 4.56 所示为该公路隧道经直方图均衡化所得的图像，图像整体层次清晰，画面自然，而且图像的轮廓变得更容易区分了，这充分说明利用直方图均衡化处理可以达到图像增强的目的。

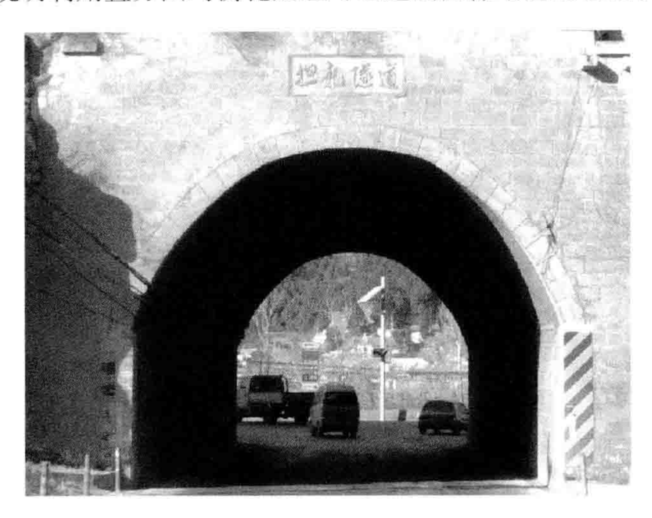


图 4.56　经直方图均衡化所得公路隧道图像

使用同样方法对北京“东方红隧道”的灰度图像进行处理，所得结果如图 4.57 所示。

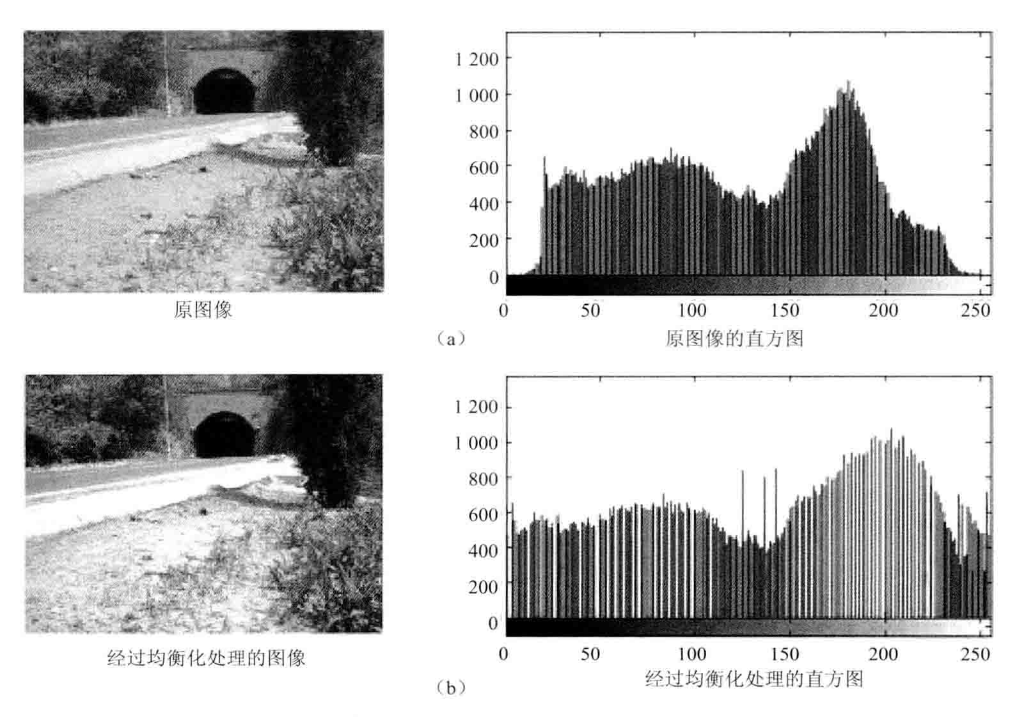


图 4.57　未处理的图像和均衡化后图像直方图对比

直方图均衡化能够自动确定变换函数，该函数能够产生具有均匀直方图的输出图像。当需要图像自动增强时，直方图均衡化是一种很好的处理方法，因为其处理结果可以预知，并且该方法操作简单。但是，如果人们希望处理的图像具有指定的直方图形状时，采用直方图均衡化的图像增强方法就不太适用了。这时，人们可以使用一种能产生特殊直方图的方法，这样的方法叫作直方图规定化或直方图匹配处理，它是直方图修正技术中的第二种常用方法。

设连续灰度级为 r 和 z（看作连续随机变量），令 $p_r(r)$ 和 $p_z(z)$ 为它们对应的连续概率密度函数。这里，r 和 z 分别代表输入和输出（已处理）图像的灰度级。则输入图像的概率密度函数为 $p_r(r)$，而 $p_z(z)$ 为希望输出图像具有的规定概率密度函数。

直方图均衡化的连续形式可用公式表示如下：

$$s = T(r) = \int_0^r p_r(w)\mathrm{d}w \tag{4.9}$$

对于均衡化正变换，再定义随机变量 z，且有：

$$v = G(z) = \int_0^z p_z(t)\mathrm{d}t = s \tag{4.10}$$

式中，t 为积分变量。

对于均衡化反变换来说，由于都是均衡化，故令 $s=v$，则有：

$$z=G^{-1}(v)=G^{-1}[T(r)] \tag{4.11}$$

公式（4.11）即为输出图像的表达式，而得到的新图像灰度级具有事先规定的概率密度函数 $p_z(z)$。

需要指出的是，直方图规定化在大多数时候都是在试凑，所以对于任何一个给定的图像增强任务，都还必须依靠实际分析。

（3）图像平滑

在图像处理过程中，常常会遇到噪声。所谓噪声，就是对外界干扰的总称。图像噪声一般表现为图像上出现各种形式的干扰斑点、条纹等。根据噪声和信号的关系可以将噪声分为加性噪声和乘性噪声，而根据噪声服从的分布情况则可将噪声分为高斯噪声、泊松噪声和颗粒噪声。由于噪声的性质不同，去除噪声的方法也不同。

平滑技术主要用于平滑图像中的噪声。平滑噪声在空间域中进行，基本方法是求解像素灰度的平均值或中值。为了既平滑噪声，又保护图像信号，也有一些改进的技术，比如在频率域中运用低通滤波技术。

1）多图像平均

当对某静止物体进行连续拍摄时，噪声会随时出现于任意地方，且各个瞬间噪声出现的位置和大小也会变化不定。在这样的情况下，最好是选择那些能够利用时间随机性来去除噪声的办法，即对多幅图像进行平均，由于噪声信号具有随机性，平均的次数越多，其平均值就越接近真值。

例如，针对现有图像噪声模型：

$$g(x,y)=f(x,y)+h(x,y) \tag{4.12}$$

通过多图像平均，可有：

$$\bar{g}(x,y)=\frac{1}{M}\sum g_i(x,y) \tag{4.13}$$

经过多次平均后，噪声信号趋于0，而图像分量虽经多次平均，仍保持不变，达到平滑的目的。但这种方法存在一个缺点，就是需要获取多幅图像，而实际能获取的图像常常只有一幅。那么，如何才能从一幅图像中把噪声除去呢？常用的方法有平滑滤波、频域滤波和数学形态学处理等。

2）邻域平均

邻域平均法是最简单的噪声去除法，它将每一像素点的灰度值设置为该点某邻域窗口内的所有像素点灰度值的平均值（或加权平均值），它是一种线性平滑技术。在实际处理过程中，利用模板对图像进行模板操作（卷积运算），该模板中所有系数都取相同值，常用的有3×3、5×5和7×7模板。

设 $f(i,j)$ 为给定的含有噪声的图像，经过邻域平均处理后的图像为 $g(i,j)$，则有：

$$g(i,j)=\frac{\sum f(i,j)}{N} \tag{4.14}$$

若 M 是所取邻域中各邻近像素的坐标，N 是邻域中包含的邻近像素的个数。现以3×3模板为例，那么，邻域平均法的模板为：

$$\frac{1}{9}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & 1^* & 1\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix} \tag{4.15}$$

上述模板中带“*”号的点为中心元素，即该像素是要进行处理的像素。通过该模板实现以下变换：

$$\begin{matrix}a_1 & a_2 & a_3\\ a_4 & a_5 & a_6\\ a_7 & a_8 & a_9\end{matrix}\xrightarrow{\text{以 }a_5\text{ 为核心，周围 9 个像素的平均值}} b_5$$

$$b_5=\frac{a_1+a_2+a_3+a_4+a_5+a_6+a_7+a_8+a_9}{9}$$

应当说明的是，邻域平均处理方法是以图像模糊为代价来减小噪声的。模板尺寸越大，噪声减小的效果也越显著，但图像也会变得越模糊。

图4.58所示为加入了椒盐噪声的“东方红”隧道的灰度图像，而图4.59、图4.60和图4.61所示为分别用3×3、5×5和7×7的线性平滑滤波器处理的含有椒盐噪声的目标图像所得结果。显然，所用模板越大，除噪效果就越好，但同时图像变得不清晰，锐化程度明显降低。



图 4.58　加入椒盐噪声的隧道灰度图像

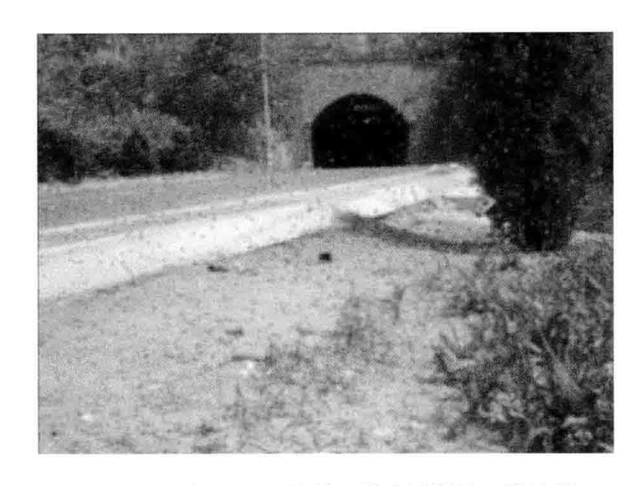


图 4.59　采用 3×3 线性平滑滤波器处理的结果



图 4.60　采用 5×5 线性平滑滤波器处理的结果



图 4.61　采用 7×7 线性平滑滤波器处理的结果

（4）中值滤波

中值滤波是求得某个像素区域内像素浓度的中央值或中间值，并将其作为目的像素浓度值的处理过程，是一种非线性平滑技术。其效果依赖于两个要素：邻域的空间范围和中值计算涉及的像素数。中值滤波能够在抑制随机噪声的同时，不使图像边缘产生模糊。其具体实现方法如图 4.62 所示，分为两步：

① 通过从图像中的某个采样窗口取出奇数个数据进行排序。如图 4.62 所示，其中蓝色框中的 9 个像素点排序后分别为 2 2 3 3 4 4 4 5 10。

② 用排序后的中值取代要处理的数据。从左起第 5 个浓度值为 4 的即为中值，用此中值取代原来中心像素即可。

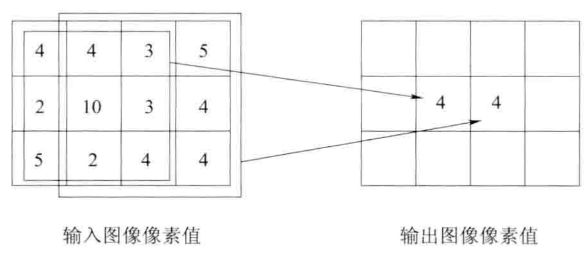


图 4.62　中值滤波示意图

中值滤波法对消除椒盐噪声非常有效，比起领域平均法，中值滤波法还能够保护边缘信息。图 4.63～图 4.67 反映了经过两种线性平滑滤波器与中值滤波器处理后的图像效果。由图可以看出，中值滤波对于滤除图像的椒盐噪声效果显著，图像上的椒盐噪声斑点全部被去除，并且较完整地保护了图像的边缘，与原图像相差不大。采用领域平均法的线性滤波器对噪声的去除和对边缘的保护作用很难统一，去噪效果好的同时破坏了图像边缘。由于后面还要对图像进行边缘提取和特征检测，所以决定用中值滤波来去除噪声。

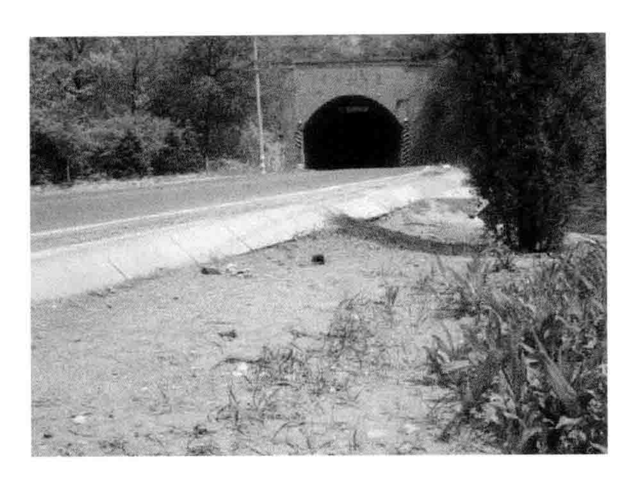


图 4.63　原始无噪声图像



图 4.64　加入椒盐噪声后的图像

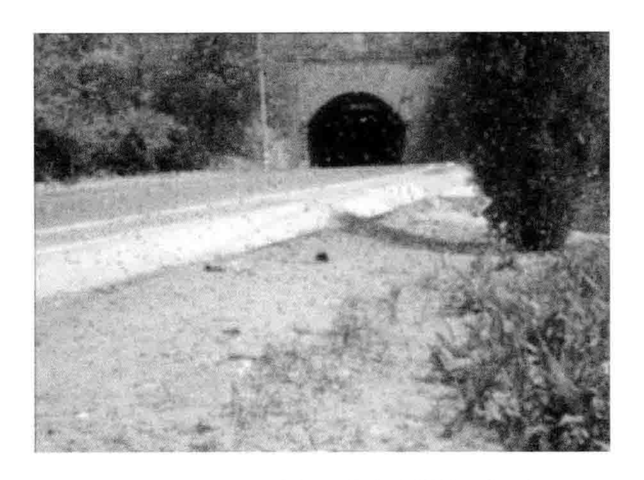


图 4.65　3×3 线性平滑滤波器处理结果



图 4.66 7×7 线性平滑滤波器处理结果



图 4.67 中值滤波器处理结果

（5）图像分割

图像分割的目的是把图像空间分成一些有意义的区域，它是实现图像自动识别与理解的必不可少的过程，是计算机视觉的中间层次。图像分割的依据建立在相似性和非连续性两个基本概念之上。

（6）边缘检测

所谓边缘，是指其周围像素灰度急剧变化的那些像素的集合，它是图像最基本的特征。边缘存在于目标、背景和区域之间，所以，它是图像分割的重要依据。由于边缘是位置的标志，对灰度的变化不敏感，因此，边缘也是图像匹配的重要特征。

边缘检测的基本思想是先检测图像中的边缘点，再按照某种策略将边缘点连接成轮廓，从而构成分割区域。由于边缘是所要提取目标和背景的分界线，提取出边缘才能将目标和背景区分开，因此，边缘检测技术对于数字图像的处理十分重要。

1）图像边缘特性

图像的边缘大致可以分为两种，一种是阶跃状边缘，其边缘两边像素的灰度值明显不同；另一种为屋顶状边缘，其边缘处于灰度值由小到大再由大到小的变化转折点处。在图 4.68 中，第 1 排是一些具有边缘的图像示例，第 2 排是沿图像水平方向的 1 个剖面图，第 3 和第 4 排分别为剖面的一阶和二阶导数。第 1 列和第 2 列是阶梯状边缘；第 3 列是脉冲状边缘；第 4 列是屋顶状边缘。

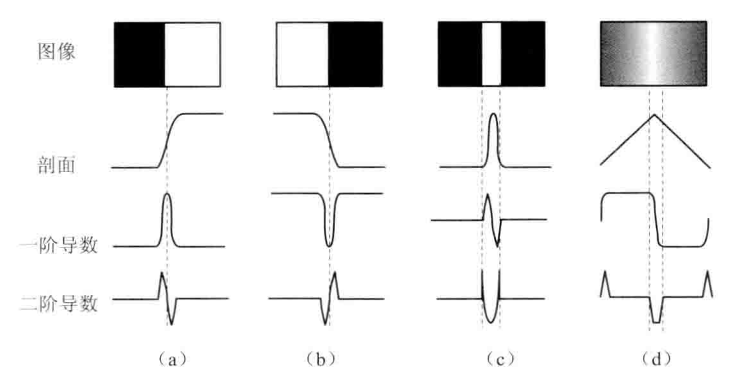


图 4.68　图像边缘特性

（a）阶梯状边缘；（b）阶梯状边缘；（c）脉冲状边缘；（d）屋顶状边缘

2）常用边缘检测

常用的边缘检测算子有一阶和二阶的。一阶导数的幅度值常被用来检测边缘的存在，幅度峰值一般对应边缘位置，常用的有梯度算子，包括 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子等；二阶导数的过零点被用来检测边缘的位置，二阶导数在过零点附近的符号则被用来确定边缘像素在图像边缘的暗区或明区，常见的有 Laplacian 算子、LOG 算子等。此外，还有一些其他边缘检测算子，如 Canny 算子、Kirsch 算子等。

边缘检测主要是通过边缘检测模板来实现的。不同的模板能起到不同的效果，适用于不同的检测场合。图 4.69 是一个使用模板检测图像的简单实例。

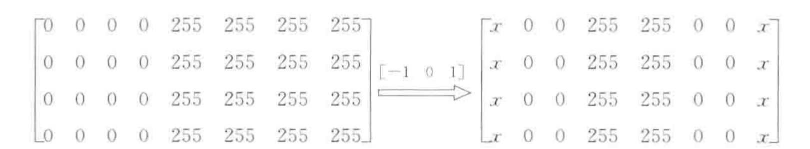


图 4.69　模板对边缘的检测

由图 4.69 可以看出，原图像左边暗右边亮，中间存在着一条明显的边缘，属于典型的阶跃状边缘。使用模板［−1 0 1］对其进行模板操作后，图像在原图像暗亮边缘处的灰度值高了很多。观察时，就能发现一条很明显的亮边，其他区域都很暗，这样就

起到了边缘检测的作用。

3）梯度算子

如前所述，图像中某物体边界上的像素点，其邻域将是一个灰度级变化带。衡量这种变化最有效的两个特征就是灰度的变化率和变化方向，它们分别以梯度向量的幅值和方向来表示。对于连续图像 $f(x,y)$，其方向导数在边缘方向上有局部最大值。因此，边缘检测就是求 $f(x,y)$梯度的局部最大值和方向。

已知 $f(x,y)$在 θ 方向沿 r 的梯度定义如下：

$$\frac{\partial f}{\partial r}=\frac{\partial f}{\partial x}\cdot\frac{\partial x}{\partial r}+\frac{\partial f}{\partial y}\cdot\frac{\partial y}{\partial r}=f_x\cos\theta+f_y\sin\theta \tag{4.16}$$

$\frac{\partial f}{\partial x}$达到最大值的条件是：

$$\frac{\partial\left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)}{\partial\theta}=0 \tag{4.17}$$

即：

$$f_x\sin\theta_g+f_y\cos\theta_g=0 \tag{4.18}$$

从而可得 $\theta_g=\arctan(f_y/f_x)$。

梯度最大值 $g=(\partial f/\partial r)_{\max}=\sqrt{f_x^2+f_y^2}$，一般称为梯度模。梯度算子具有位移不变性和各向同性的性质，适用于图像的边缘检测，而灰度变化的方向，即边界的方向，则可由 $\theta_g=\arctan(f_y/f_x)$得到。需要注意的是，梯度算子总有两个模板。

① Roberts 算子。Roberts 算子的模板如图 4.70 所示，它是一种利用局部差分来寻找图像边缘的算子，对具有陡峭低噪声的图像处理效果较好。

② Prewitt 算子。Prewitt 算子的模板如图 4.71 所示，它能产生一幅边缘幅度图像，对灰度渐变而噪声较多的图像处理效果较好。该算子左边一个模板对纵向亮度差较为敏感，检测水平边缘效果较好；右边一个模板对横向亮度差较为敏感，检测垂直边缘效果较好。

$$\begin{bmatrix}1 & 0\\0 & -1\end{bmatrix}\quad\begin{bmatrix}0 & 1\\-1 & 0\end{bmatrix}$$

图 4.70 Roberts 算子

$$\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\0 & 0 & 0\\-1 & -1 & -1\end{bmatrix}\quad\begin{bmatrix}1 & 0 & -1\\1 & 0 & -1\\1 & 0 & -1\end{bmatrix}$$

图 4.71 Prewitt 算子

③ Sobel 算子。Sobel 算子的模板如图 4.72 所示，左边一个模板对纵向亮度差较为敏感，检测水平边缘效果较好；右边一个模板对横向亮度差较为敏感，检测垂直边缘效果较好。它能产生一幅边缘幅度图像，对灰度渐变和噪声较多的图像处理效果较好。与 Prewitt 算子相比，Sobel 算子对像素位置的影响做了加权，因此效果更好。

④ Laplacian 算子。Laplacian 算子是一种各向同性算子，其两种模板的形式如图 4.73 所示。在只关心图像边缘的位置而不考虑图像周围的像素灰度差值时使用比较合

适。因为是一个二阶算子，一般只用来求出轮廓的强度。它的传递函数在频率域空间的原点是零，因此经拉普拉斯滤波处理过的图像具有零平均灰度。Laplacian 算子对孤立像素的响应比对边缘或线的响应更加强烈，因此只适用于无噪声图像。在有噪声的情况下，使用该算子检测边缘之前需要先进行低通滤波。

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

图 4.72　Sobel 算子

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

图 4.73　Laplacian 算子

⑤ LOG（Laplacian-Gauss）算子。LOG 算子先用高斯低通滤波器将图像进行预先平滑，然后用 Laplacian 算子找出图像中的陡峭边缘，最后用零灰度值进行二值化产生闭合的、连通的轮廓，消除所有内部点。对于噪声点的处理效果好于单独使用 Laplacian 算子时的效果。常用的 LOG 算子是 5×5 的模板，其形式如图 4.74 所示。

$$\begin{bmatrix} -2 & -4 & -4 & -4 & -2 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -4 & 8 & 24 & 8 & -4 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -2 & -4 & -4 & -4 & -2 \end{bmatrix}$$

图 4.74　LOG 算子

⑥ Kirsch 算子。Kirsch 算子是掩模法中的一种，图像中的每个点都用 8 个掩模进行卷积，每个掩模对某个特定边缘方向做出最大响应。所有 8 个方向中的最大值作为边缘幅度图像进行输出。最大响应掩模的序号构成了对边缘方向的编码。实际运用时，对一个像素考察它的 8 个邻点灰度变化，以其中 3 个邻点的加权和减去剩下 5 个邻点的加权和，令 3 个邻点环绕不断移位，取其差值的最大值作为 Kirsch 算子值。图 4.75 所示为一种 Kirsch 算子的模板。

$$\begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -3 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -3 & -3 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & 5 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & 5 & 5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & 5 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & -3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 5 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & -3 & -3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 5 & 5 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}$$

图 4.75　Kirsch 算子

⑦ Canny 算子。Canny 算子检测边缘的方法是寻找图像梯度的局部最大值，梯度是用高斯滤波器的导数计算的。Canny 算子使用两个阈值来分别检测强边缘和弱边缘，而且仅当弱边缘与强边缘相连时，弱边缘才会包含在输出中。因此，该方法不易受噪声干扰，能够检测到真正的弱边缘。

4）各种边缘检测算子比较

分别采用 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子、LOG 算子和 Canny 算子对“东方红”公路隧道图像进行边缘检测，检测结果如图 4.76～图 4.81 所示。

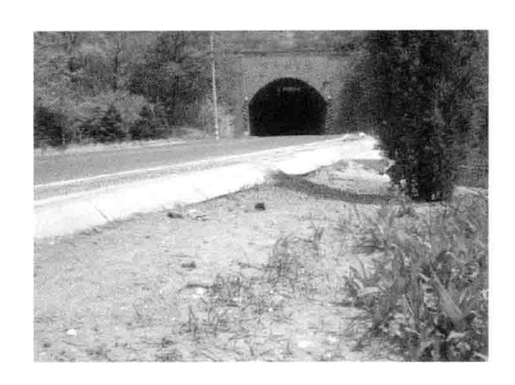


图 4.76　原始图像



图 4.77　使用 Roberts 算子提取边缘效果



图 4.78　使用 Prewitt 算子提取边缘效果



图 4.79　使用 Sobel 算子提取边缘效果



图 4.80　使用 LOG 算子提取边缘的效果

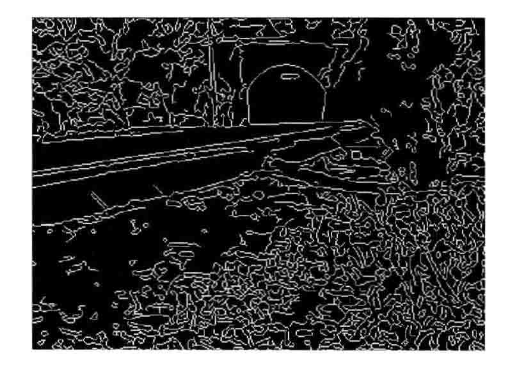


图 4.81　使用 Canny 算子提取边缘效果

由不同算子进行边缘检测的结果可以看出：Roberts 算子只是粗略地提取了物体的边缘，很多细节部分不能很好地提取出来；Prewitt 算子与 Sobel 算子对边缘的提取效果较为相似，能较好地提出其中的水平和垂直部分；Canny 算子对物体的边缘信息提取较好，但同时也提取了较多背景的边缘，对后续处理可能会造成一定影响；LOG 算子对图像细节的提取相对较为完整。

综合比较几种边缘提取的常用梯度算子的处理效果，最后选用 Sobel 算子进行边缘提取。图 4.82 是用 Sobel 算子对图 4.53 进行边缘检测后的图像，从图中基本可以看出隧道的形状，由抛物线和直线组成。但采用 Sobel 算子进行边缘提取也还存在一定的缺陷，例如，图 4.82 中隧道底部直线在某些地方没有连接在一起，在某些地方断开了，没有构成闭合的形状。

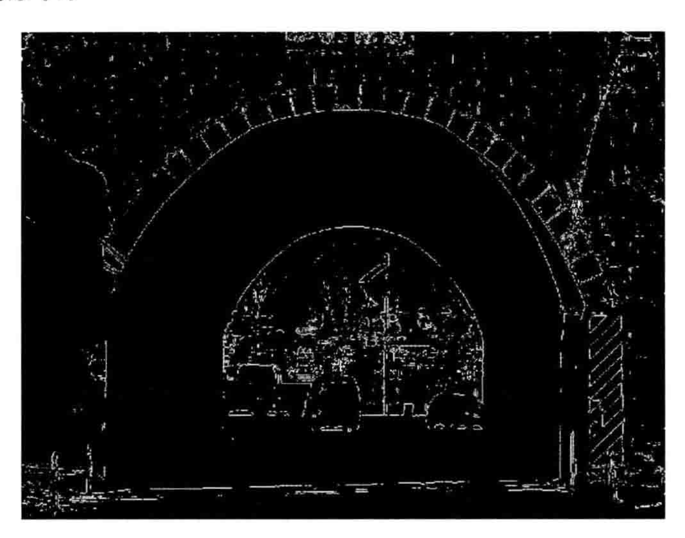


图 4.82　Sobel 算子进行边缘检测后所得隧道图像

（7）数学形态学处理

原始图像经过滤波、边缘检测等一系列相关处理，成为用 0/1 表示的二值图像。其中，0 为黑色，表示为图像背景；1 为白色，表示图像前景（目标物体）。这时，可以进一步进行数学形态学处理。

数学形态学运算是一种针对二值图像依据数学形态学的集合论方法发展起来的图像处理方法。数学形态学起源于岩相学对岩石结构的定量描述工作，近年来在数字图像处理和机器视觉领域中得到了广泛的应用，形成了一种独特的数字图像分析方法和理论。

通常形态学图像处理方法表现为一种邻域运算形式。在该方法中，一种经特殊定义的邻域称为“结构元素”，在每个像素位置上，该“结构元素”与二值图像对应的区域进行特定的逻辑运算，逻辑运算的结果为输出图像的相应像素。形态学运算的效果取决于“结构元素”的大小、内容以及逻辑运算的性质。基本的二值形态运算有 4 种：膨胀、腐蚀、闭合与开启。在此只讨论其中的膨胀和腐蚀。

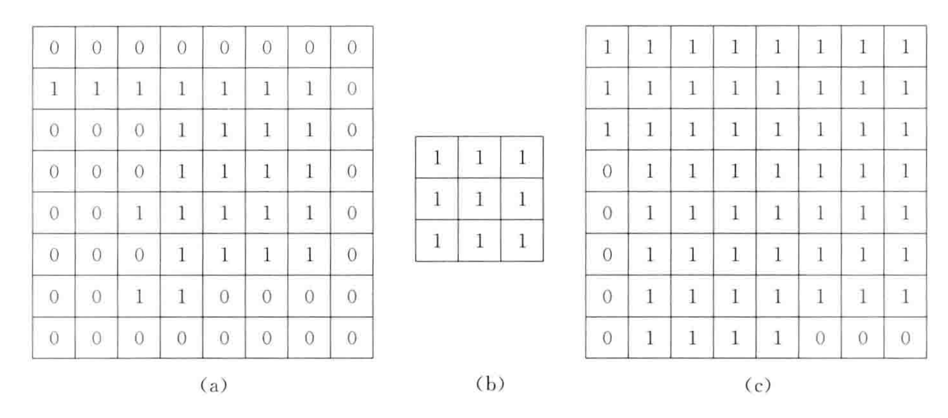
1）膨胀

用结构元 S 对二值图像 B 进行的膨胀运算表示为 $B \oplus S$，定义如下：

$$B \oplus S = \bigcup_{b \in B} S_b \tag{4.19}$$

这种合并运算可以认为是一种邻域算子。用结构元 S 扫过整幅图像，输出图像的

像素值初始化为 0，一旦结构元的原点每次遇到二值图像中值为 1 的像素时，结构元整体形状就与输出图像进行逻辑“或”运算。图 4.83（a）是二值图像，图 4.83（b）是 3×3 方形结构元，图 4.83（c）是经该方形结构元膨胀后的结果。



0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	1	1	1	1	0
0	0	1	1	1	1	1	0
0	0	0	1	1	1	1	0
0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

（a）

1	1	1
1	1	1
1	1	1

（b）

1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	0	0	0

（c）

图 4.83　基本的二值形态运算，前景像素值为 1，背景像素值为 0

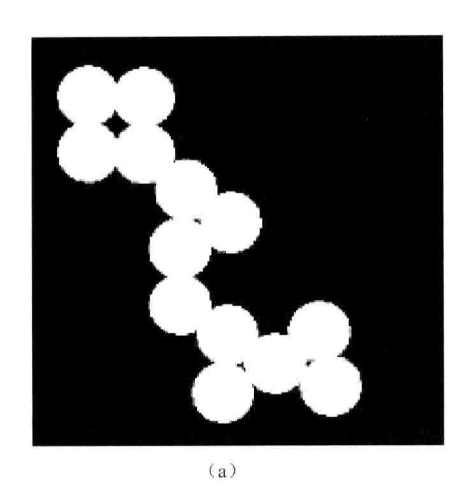
（a）二值图像 B；（b）结构元 S；（c）膨胀运算 $B \oplus S$

现在考虑二值图像 B 中的第一个值为 1 的像素，其坐标是［1，0］，表示位于图像的第 1 行、第 0 列。平移 $S_{(1,0)}$ 的意思是将结构元 S 的原点（即中心）与二值图像上的点［1，0］重合，然后把结构元中的每一点与输出图像对应点进行逻辑“或”运算，这种“或”运算的结果是输出图像（像素初值为 0）在实际点［0，0］、［0，1］、［1，0］、［1，1］、［2，0］和［2，1］处的像素为 1，在点［0，−1］、［1，−1］和［2，−1］处的像素值也为 1，但这几个位置实际上是不存在的，所以要予以忽略。对于二值图像 B 的下一个像素［1，1］，平移 $S_{(1,1)}$ 的意思就是将结构元 S 的原点与二值图像 B 上的点［1，1］重合，再把结构元的每个点与图像中的对应点进行“或”运算，输出图像在位置［0，0］、［0，1］、［0，2］、［1，0］、［1，1］、［1，2］、［2，0］、［2，1］和［2，2］处的像素值为 1。这个过程继续进行，直到输入图像的每个像素都进行完逻辑“或”运算为止，最后结果显示在图 4.83（c）中。

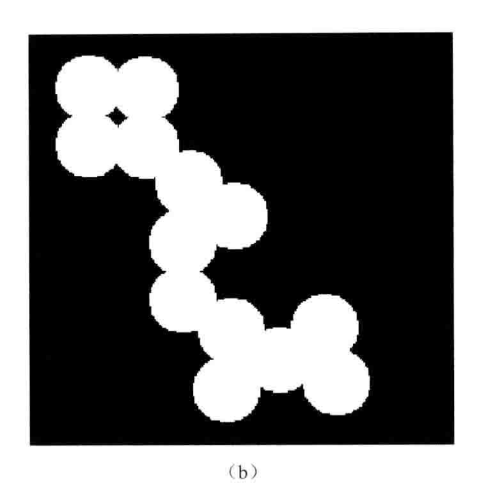
图 4.84（a）和图 4.84（b）分别是原图以及经过膨胀运算之后的图像，对比这两幅图像可以看出膨胀运算使区域有所扩大。

在此，对采用 Sobel 算子进行边缘检测后所得隧道图像（图 4.82）再次进行膨胀运算处理，处理效果如图 4.85 所示，从图中可以看出原来在隧道底部的一条条线段被连接起来，构成了一条完整线段，从而可以比较清楚地看出隧道的形状。

为了更清楚地了解上述算子在膨胀处理中的作用与效果，分别采用这些算子对北京“东方红”公路隧道的原始图像进行了膨胀处理，图 4.86～图 4.91 所示为隧道的原始图像和由不同算子经膨胀运算后所得结果，由膨胀结果可以看出，使用 Canny 算子和 LOG 算子提取边缘后进行膨胀处理，在需要检测的边缘被凸显出来的同时，背景中过



（a）



（b）

图 4.84　二值形态图像处理

（a）原图；（b）经膨胀运算所得图像

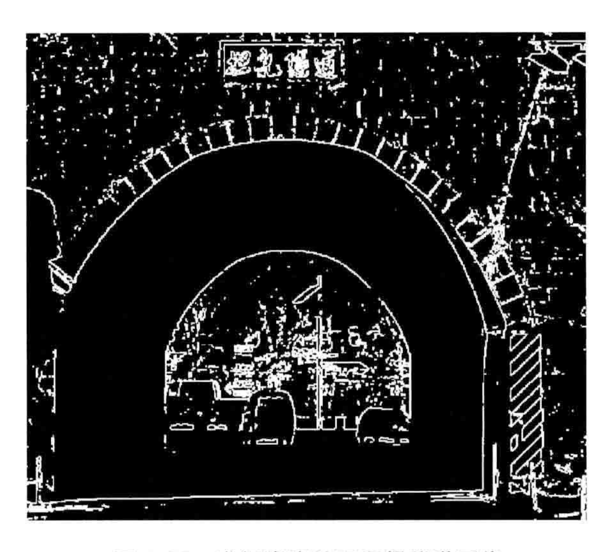


图 4.85　进行膨胀处理所得隧道图像

多的细节也被凸显得十分厉害，对后续识别处理显然不利，主要原因还是这两个算子对图像的细节提取过多所致；Roberts 算子、Prewitt 算子和 Sobel 算子经过膨胀处理后的结果差不多，但 Prewitt 算子和 Sobel 算子对需要检测的边缘提取得较为完整，也较为清晰。

2）腐蚀

腐蚀是一种消除边界点，使边界向内部收缩的过程。它可以用来消除微小且无意义的物体。腐蚀概念定义为：A、B 为 Z^2 中的集合，A 被 B 腐蚀，记为 $A\Theta B$，有：

$$A\Theta B=\{x|(B)_x\subseteq A\} \tag{4.20}$$

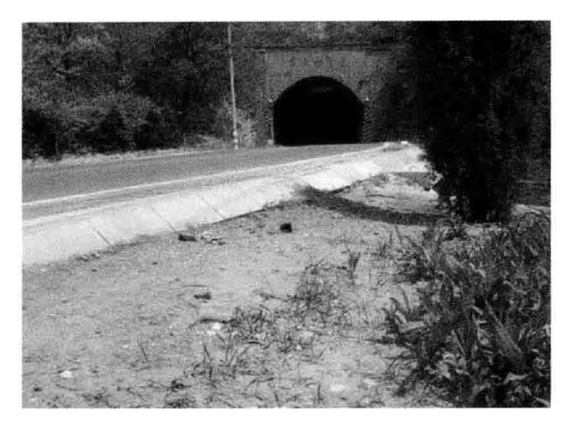


图 4.86　原始灰度图像



图 4.87　Roberts 算子提取后的膨胀结果



图 4.88　Prewitt 算子提取后的膨胀结果

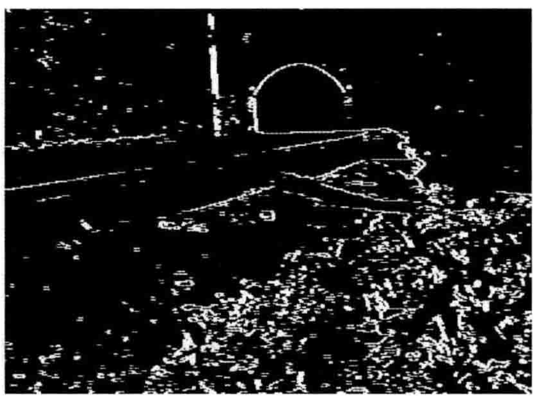


图 4.89　Sobel 算子提取后的膨胀结果

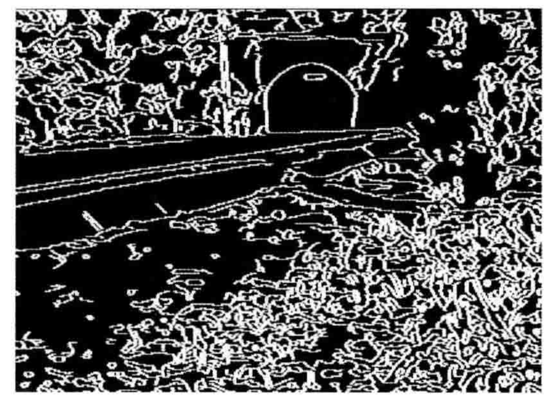


图 4.90　Canny 算子提取后的膨胀结果

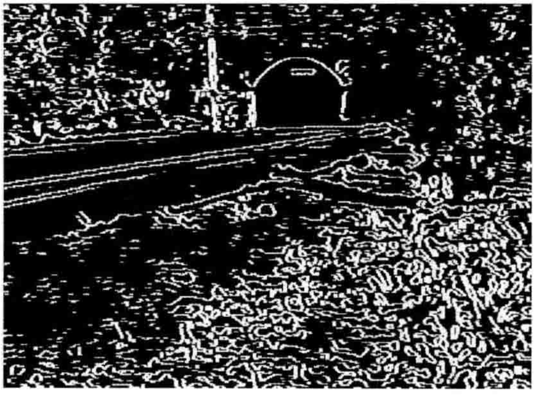


图 4.91　LOG 算子提取后的膨胀结果

也就是说，A 被 B 腐蚀的结果是所有使 B 被 x 平移后包含于 A 的点 x 的集合。与膨胀一样，公式（4.20）也可以用相关运算来理解。由于进行边缘提取的图像一般不进行腐蚀运算，因此，在此不显示其效果图。

4.4.4 图像畸变校正算法的理论研究与技术探索

装置在智能作战机器人运动云台上的视觉传感器在随云台做水平方向和垂直方向分幅、分层扫描时，其采集到的图像会随着角度和距离的变化而发生畸变，这样在进行全景图像拼接时就会产生误差，不利于探测子系统对洞库类目标做出正确的识别与判断。因此，必须进行图像畸变校正算法的理论研究与技术探索。

1. 图像畸变校正算法简介

随着数字信号处理技术和计算机技术的迅猛发展，机器视觉的研究深度在不断拓展，应用领域在不断延伸，诸如移动机器人、无人飞行器、自主行驶车等高新技术装备均已成为机器视觉成功应用的典范，基于机器视觉的目标探测、对象跟踪以及模式识别技术现已成为各国学者研究的热点。但在机器视觉系统中，由于光敏器件的质量、光学镜头的类型以及视觉系统的理论误差、加工偏差等的不利影响，使得通过机器视觉系统采集到的图像存在一定程度的畸变。采用广角镜头采集到的图像，其畸变尤为明显，只有中心视场小区域（大约占全视场的 10%）内的图像可以看作是理想的。如果不对这种畸变图像加以科学、合理、有效地校正，不但图像的视觉效果不佳，而且会影响到目标识别和对象跟踪的质量与效率，甚至出现虚警和漏判现象。

采用传统的畸变图像校正方法对机器视觉系统所获得的畸变图像进行校正，会导致非线性畸变的求解与成像系统内、外参数的求解混合在一起，这样不仅增加了求解过程的复杂性，同时由于各未知参数的互相牵制，很难获得满意的精度。Faig 等人采用直接非线性最小优化法来进行畸变图像的校正，虽然精度有所提高，但是模型复杂，运算量很大，且选取初值需要进行非线性搜索，增加了该方法的使用难度；Tsai 等人采用基于径向排列约束的两步校正法来进行畸变图像的校正，处理过程相当简洁，收敛速度也很快，但是当像素分辨率较高时，该方法的运算精度偏低；而当前常用的三角形线性坐标变换法则存在如下的两个局限性：一是该方法认为在图像的一个局部小区域内可假设线性关系成立，然而事实上图像的几何失真是非线性的，故这一假设本身就引入了误差；二是采用三角形线性坐标变换法对失真图像进行校正会使得原图像的边缘信息丢失；有人提出了一种基于神经网络的畸变图像校正算法，实验结果表明，该算法具有良好的精度，且具有自学习性，但不足之处在于该算法耗时长，且内存占用率高。

一种良好的畸变图像校正算法主要应考虑信息的完整性、校正的精确性、运算的复杂性和处理的实时性等因素，合理有效的畸变图像校正算法应在保证图像信息不丢失且满足精度要求的基础上运算量尽可能小，以满足实时性的要求。现有的畸变图像校正算法大多没能很好地解决校正精度与实时性的矛盾，因此有必要对非线性畸变校正算法做

进一步的研究。在以往文献的基础上做如下的研究和改进工作：

① 提出一种基于四边形分片逼近的方法来拟合高次多项式校正模型，以提高几何校正的实时性。

② 采用将数学形态学和滑动临域操作相结合的方法，确定失真图像像素点的质心，使精度达到亚像素级。

③ 采用两步一维线性灰度级插值向后映射算法确定输出图像中像素点的灰度，以有效避免空洞现象的出现，并减少插值运算的运算量。

2. **非线性畸变图像校正的数学模型**

畸变是成像系统的一种像差，理想的成像系统不仅应该成像清晰，而且应该满足物像相似关系。当系统能够清晰成像，但物像不相似时，其不相似的程度就是用畸变来衡量的。图 4.92 所示为机器视觉系统成像示意图。

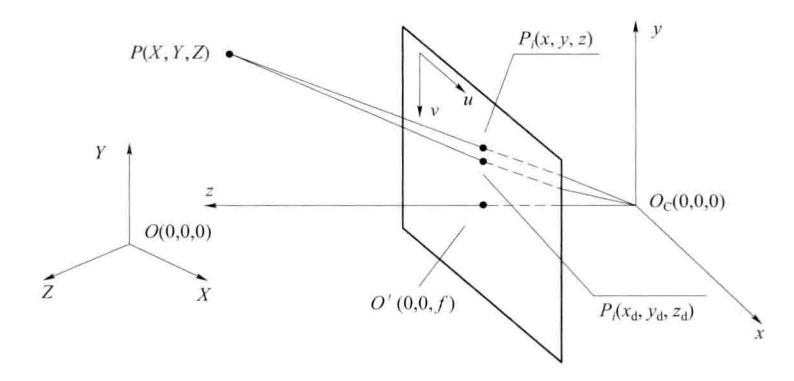


图 4.92 机器视觉系统成像示意图

在图 4.92 中，$O-XYZ$ 是世界坐标系，表示物理空间，$O-xyz$ 是摄像机坐标系，$P(X,Y,Z)$是世界坐标系中的任意一点，$O_C(0,0,0)$是摄像机主点，$\Pi(x,y)$是摄像机前像面，像面坐标系为 $xO'y$，$O'(0,0,f)$是光学中心，$P_i(x,y,z)$是理想像点位置，$P_i(x_d,y_d,z_d)$是 $P_i(x,y,z)$所对应的畸变像点位置。

畸变过程描述的是理想像点位置和实际像点位置的映射关系，即$(x,y,z)=f(x_d,y_d,z_d)$，畸变校正关键在于确定此映射关系。机器视觉系统所采集图像的几何畸变是非线性的，因此可用坐标间的多项式变换来表示该非线性变换：

$$\begin{cases} x_d = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{n-i} a_{ij}x^i y^j \\ y_d = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{n-i} b_{ij}x^i y^j \end{cases} \tag{4.21}$$

校正精度与 n 有关，n 越大，校正精度越高，但随着 n 的增加，校正时的计算量会急剧增加。

需要指出，畸变的实质是一种像差，与其所在空间的位置无关，当机器视觉系统的

光敏器件和光学镜头确定时，畸变就相应确定了。畸变校正主要是要确定出畸变图像与理想图像之间的函数关系。对于公式（4.21）所示的模型，在已知部分畸变点坐标（x_d，y_d）与理想成像点坐标(x，y)的情况下，可以由多个采样点的坐标关系得到一个超定线性方程组，这样用最小二乘法就可解算该方程组。

3. 非线性数字图像校正算法的原理

对畸变图像进行校正本质上是对一幅退化图像的恢复。畸变主要体现在图像中像素点发生位移，从而使图像中的物体扭曲变形。畸变校正包括空间坐标变换和像素点灰度级确定两部分工作。坐标变换的目的是使像素落在正确的位置上，灰度级确定是对图像进行视觉上的修正。

在认真研究、合理借鉴、科学地融合国内外相关技术及其成果的基础上，通过长期、系统和细致的研究，提出了一种基于四边形分片逼近控制点机理的数字图像畸变校正算法，其流程如图 4.93 所示。该算法的要点是：首先，设计一幅标准的目标点阵图像，用机器视觉系统对标准点阵进行采集，得到发生畸变的点阵图像；其次，需要确定光学系统的光学中心，为了解算方便，在建立畸变校正模型时，将图像坐标原点设在光心处；再次，采用基于数学形态学和滑动邻域操作相结合的方法确定畸变图像点阵中对应点的坐标，并根据标准点阵中对应点的坐标，运用基于四边形分片逼近控制点原理确定畸变校正模型参数；此后根据畸变校正模型进行几何变换；最后，运用两步一维线性插值向后映射法对像素点灰度进行恢复。

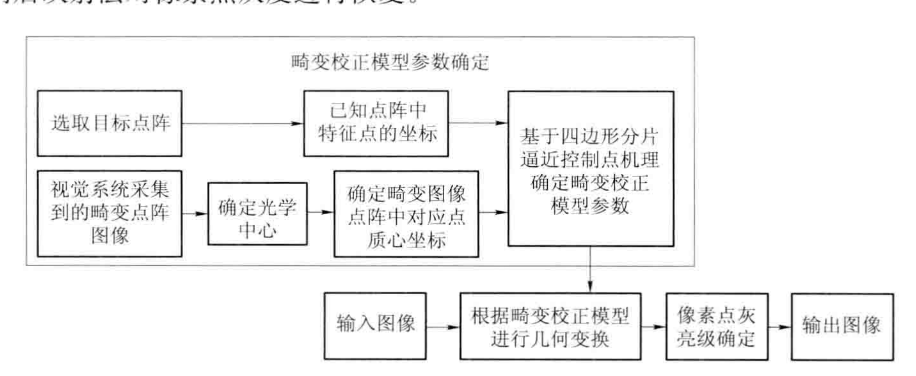


图 4.93　基于四边形分片逼近控制点的数字图像畸变校正算法的流程

（1）目标点阵的选取

目前，常用的目标面图案有网格形图案、点阵形图案和栅格形图案。其中，网格形图案分划线需要做得很细，否则分划线的位置精度会受到影响。然而，在用数字图像方法测量畸变时，由于图像像素间的相互影响，分划线太细易造成分划线与背景的对比度不够，从而使目标分离较为困难；另外，应用网格形图案作为目标时，需要拟合各行和各列的曲线，计算行和列的交点，从而得到各个目标点的位置，但网格中的行和列因畸变严重而难以拟合，造成目标采样点的位置坐标不够准确。采用栅格形图案进行测量

时，需要在行方向和列方向分别测量一次，过程比较烦琐，目标采样点的位置精度也不高，而且目标采样点与其像点位置很难对应。采用点阵形图案作为目标，精度能够达到亚像素级，数字图像处理过程也比较简单，因此采用点阵图像作为测量目标，该点阵为一幅等距 17×13 的黑点白底点阵图像，各点由 25 个像素组成。

（2）光学中心的确定

建立校正模型时，为了解算方程方便，图像坐标原点应设在光学中心处。由于光敏元件的几何中心并不位于镜头光轴上，不能直接把几何中心作为光学中心，因此需要预先确定光学中心。光学中心的确定包括确定像面上光学中心位置和确定其对应物点的位置，这一工作是图像校正的前提。

采用数字图像搜索法确定光学中心，具体实现步骤如下：

① 以 A 点为假想光学中心，确定 A 点的物像对应坐标，并计算 A 点为假想光学中心时系统畸变校正后残余畸变的大小。

② 分别计算 A 点周围 8 个点为假想光学中心时系统畸变校正后残余畸变的大小，如果 8 个点的残余畸变都大于 A 点的残余畸变，则转到④。

③ 如果 8 个点中 B 点的残余畸变最小且小于 A 点的残余畸变，则将 B 点赋给 A 点，同时修正 A 点对应的物像空间坐标，并转到②。

④ 停止计算，A 点即为光学中心。

由上述数字图像搜索法确定光学中心的步骤可知，光学中心是沿着残余畸变变小的方向进行搜索的。这种方法计算速度快，无须硬件操作和调整要求，且物像对应关系精度高。

（3）对应点质心位置的确定

首先对采集到的发生畸变的点阵图像进行二值化处理，目的是将目标点与背景分离。畸变图像二值化处理后，对应点的图像比较大，为了缩小对应点的图像，需要对图像进行腐蚀。如前所述，图像腐蚀是二值形态学的基本运算之一。形态学的基本思想是使用具有一定形态的结构元素来度量和提取图像中的对应形状，从而达到对图像进行分析和识别的目的。数学形态学可以用来简化图像数据，保持图像的基本形状特性，同时去掉图像中与研究目的无关的部分。失真图像经过腐蚀以后，虽然对应点缩小，但是其质心位置仍然没有确定。为了确定对应点的质心位置，可采用滑动邻域操作。为此，首先选择一个邻域，让该邻域在失真图像上滑动，求出各个邻域的和，然后利用求局部极值的方法确定对应点的质心位置。具体实现过程如下：

① 选择一个单独的待处理像素；

② 判断像素的邻域；

③ 对邻域中的像素值应用一个求各邻域的和并求局部极值的函数，该函数将返回标量计算结果；

④ 找到输出图像与输入图像对应位置的像素，将该像素的数值设置为上一步中得

到的返回值；

⑤ 对输入图像的每一个像素都重复步骤①～④。

（4）基于四边形分片逼近控制点机理的畸变校正模型参数的求解

多项式校正模型可以通过增加多项式次数来提高校正精度，但缺点是随着次数的增加，计算量也急剧增加。为了减少计算量，可使输入的控制点形成一个栅格，此栅格映射为输出图像中连通的、水平放置的矩形栅格。输入的控制点映射为相应矩形的顶点，同时，每个输入多边形内的各点映射成为对应输出矩形内的各点。为此，可采用双线性插值进行控制栅格插值计算，而且可以产生一个能保持连续性和连通性的光滑映射。双线性空间变换的一般表达式是：

$$G(x,y)=F(x',y')=F(ax+by+cxy+d,ex+fy+gxy+h) \tag{4.22}$$

在利用双线性插值进行控制栅格插值解算参数的传统方法上做了些改进，提出了一种基于四边形分片逼近控制点机理的畸变校正模型参数的求解算法。该算法通过重新定义公式（4.22）中的系数 a 和 e，可将公式（4.22）写为：

$$G(x,y)=F[x+\mathrm{d}x(x,y),y+\mathrm{d}y(x,y)] \tag{4.23}$$

式中，$\mathrm{d}x(x,y)$ 和 $\mathrm{d}y(x,y)$ 表示像素的位移量，它们是 x 和 y 的双线性函数。

图 4.94 显示了这些位移量以及输入四边形和对应的输出四边形。这样问题就归结为如何为矩形内所有点确定 $\mathrm{d}x(x,y)$ 和 $\mathrm{d}y(x,y)$。既然 $\mathrm{d}x(x,y)$ 和 $\mathrm{d}y(x,y)$ 关于 x，y 是双线性的，则沿着每一个输出行，它们就关于 x 应是线性的。因此，对于每一行可以定义一个增量 Δx 如式（4.24）所示（假定像间隔为 1），并类似地定义 $\mathrm{d}x(x+1,y)$。

$$\mathrm{d}x(x+1,y)=\mathrm{d}x(x,y)+\Delta x \tag{4.24}$$

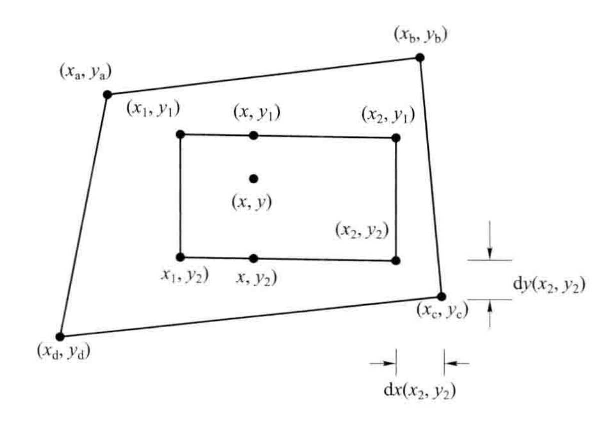


图 4.94　基于四边形分片逼近的控制点位移示意图

增量 Δx 随着行的不同而变化，但在输出矩形顶点的位移值可以非常容易地计算出来，即通过给定顶点的位移插值来求得。实现公式（4.24）仅需要两个加法，一个用于 $\mathrm{d}x(x,y)$，另一个用于 $\mathrm{d}y(x,y)$，这样就可为每一个输出像素计算出相应输入点的坐标值，从而可以确定出每个输入多边形内的各点与对应输出矩形内的各点的映射关系。

对于那些视场大、图像失真特别严重的情况，仅用一个由四边形到矩形的映射不足以描述所期望的空间变换，这时可在输入图像中指定一组互相邻接的四边形，使之映射成为输出图像中一组相邻的矩形，这样就可用最小二乘法求解模型参数。

（5）输出图像像素点灰度级的确定

当应用校正模型校正畸变图像时，虽然畸变图像的像素坐标为整数，但校正后的坐标大多并不为整数，因此必须使用相应方法确定输出图像像素点的灰度级。提出采用两步一维线性灰度级插值向后映射的算法来确定输出图像中像素点的灰度，具体方法是：输出像素可依次地映射回输入图像中，以确定其灰度级，如果一个输出像素被映射到四个输入像素之间，则其灰度值由灰度级插值决定。向后映射可逐像素、逐行地产出输出图像，每个像素的灰度级由最多四个像素参与的插值所唯一确定。该方法可有效地防止图像信息丢失，避免出现空洞现象。

双线性插值方法是一种常用的灰度级插值方法，与最近邻插值法相比，该算法精度高，没有灰度不连续的问题，但其计算过程较复杂，计算量也较大，会影响到畸变校正的实时性。提出了一种两步一维线性灰度级插值方法，具体原理如下：

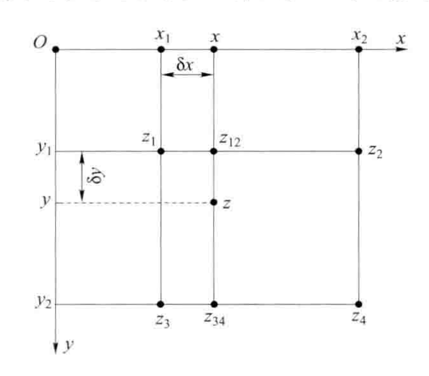


图 4.95　两步一维线性灰度插值原理图

假定(x_1, y_1)、(x_2, y_1)、(x_1, y_2)、(x_2, y_2)为与插值点(x, y)相邻近的四个点，它们的灰度值分别为 z_1、z_2、z_3、z_4，其中 $x_1 \leqslant x \leqslant x_2$ 和 $y_1 \leqslant y \leqslant y_2$，双线性函数定义为 $z=f(x,y)=q_1+q_2x+q_3y+q_4xy$。若固定变量 x（或 y），则函数 $f(x,y)$ 与变量 x（或 y）呈线性关系。

利用二维双线性函数的可分离性，即二维双线性函数可以看作两个一维线性函数的乘积，将二维双线性插值算法分为两步一维线性插值来实现：先沿着水平方向进行一维线性插值，再沿着垂直方向作一维线性插值（原理如图 4.95 所示），即：

$$z_{12}=z_1+(z_2-z_1)\cdot\delta x, z_{34}=z_3+(z_4-z_3)\cdot\delta x \tag{4.25}$$

$$z=z_{12}+(z_{34}-z_{12})\cdot\delta y \tag{4.26}$$

则由公式（4.25）和公式（4.26）可得：

$$\begin{aligned} z &= z_1+(z_2-z_1)\cdot\delta x+\{[z_3+(z_4-z_3)\cdot\delta x]-[z_1+(z_2-z_1)\cdot\delta x]\}\cdot\delta y \\ &= z_1+(z_2-z_1)\cdot\delta x+[z_3-z_1+(z_4-z_3-z_2+z_1)\cdot\delta x]\cdot\delta y \\ &= z_1+(z_2-z_1)\cdot\delta x+(z_3-z_1)\cdot\delta y+(z_4-z_3-z_2+z_1)\cdot\delta x\cdot\delta y \end{aligned} \tag{4.27}$$

式中，$\delta x=x-x_1$，$\delta y=y-y_1$，且 $0\leqslant\delta x\leqslant 1$，$0\leqslant\delta y\leqslant 1$。

公式（4.27）所得结果与直接进行二维双线性法插值的结果相同，但提出的两步一维线性灰度插值方法大大提高了插值的计算效率，从而使畸变校正的实时性得以提高。

4. 实验结果与分析

(1) 实验结果

采用所提出的基于四边形分片逼近控制点机理的数字图像畸变校正算法对智能作战机器人探测子系统采集的图像进行了畸变校正。图 4.96 为输入的 17×13 的目标点阵，各黑点均由 25 个像素组成。图 4.97 为探测子系统采集到的畸变图像，通过对图 4.96 和图 4.97 的对应点采用基于四边形分片逼近控制点机理的几何校正算法，以得到畸变图像与几何图像的映射关系，然后采用两步一维灰度插值向后映射算法，得到校正后的目标点阵图像如图 4.98 所示。

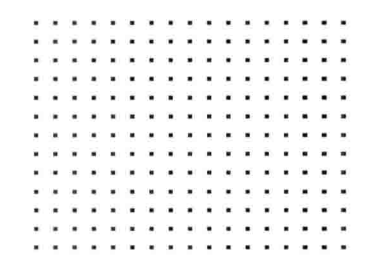


图 4.96　目标点阵图像

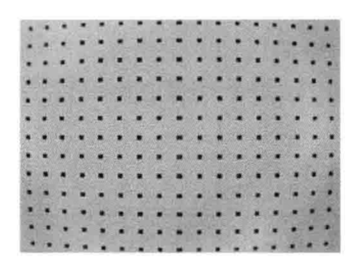


图 4.97　视觉系统采集图像

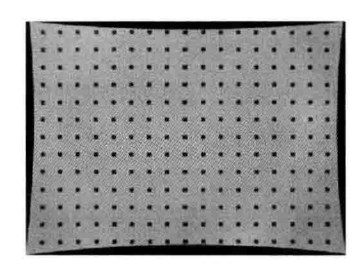


图 4.98　畸变校正后点阵图像

该算法采用 C 语言和线性汇编语言混合编程的方法实现，主程序用 C 语言编写，影响速度的关键代码放进子程序用汇编语言编写，所处理视频图像的分辨率为 768×494。在主频为 600 MHz 的 TMS320DM6437 DSP 上采用所提出的畸变校正算法校正一帧图像所用时间为 0.036 s，即 1 s 内可以校正 27 帧图像，具有良好的实时性。

图 4.99～图 4.101 所示为智能作战机器人探测子系统采集到的原始图像和进行畸变校正的结果。其中，图 4.99 为子系统采集到的原始畸变图像，由图可知其发生了桶形失真。图 4.100 为畸变校正后的图像，图 4.101 为对校正后的图像进行边缘冗余信息剪裁后的结果。从这两幅图可知，图像畸变被有效予以了校正，没出现空洞和信息丢失现象，且图像颜色没发生失真，从而验证了所提出算法的有效性。

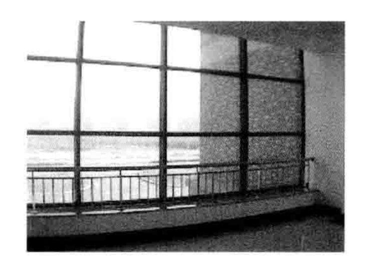


图 4.99　发生桶形畸变的图像

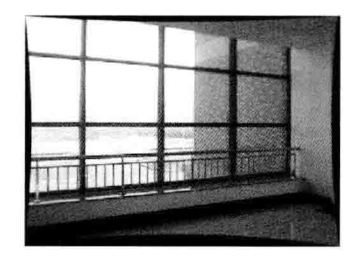


图 4.100　校正后的图像

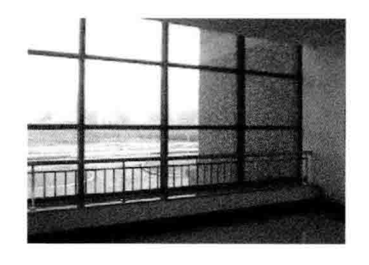


图 4.101　剪裁冗余信息后的图像

(2) 畸变校正精度分析

为了获得良好的校正精度，需要对畸变校正结果进行分析，可通过计算对应像素点

的坐标残差的均方差 δ_x、δ_y 来衡量校正精度：

$$\begin{cases} \delta_x = \sqrt{\dfrac{1}{n-1}\sum_{ij}(x_{ij}-x_{lij})^2} \\ \delta_y = \sqrt{\dfrac{1}{n-1}\sum_{ij}(y_{ij}-y_{lij})^2} \end{cases} \tag{4.28}$$

式中，(x_{ij}, y_{ij})和(x_{lij}, y_{lij})分别为修正后的图像点的坐标和理想成像的图像点的坐标。

如果用来标定畸变模型的图像和修正用的图像是同一幅，则畸变残差均方差为自标定残差均方差，自标定残差均方差表明校正模型的拟合精度；如果不是同一幅，则畸变残差均方差为互标定残差均方差，互标定残差均方差表明实际校正精度。畸变校正误差分析结果见表 4.4。由误差分析结果可知，采用提出的畸变校正算法对探测子系统采集到的图像进行畸变校正的误差在 0.31 个像素以内，可满足智能作战机器人对图景拼接的精度要求。

表 4.4 畸变校正误差分析结果

畸变校正误差评价方式	精度/像素
x 方向自标定残差均方差	0.263
y 方向自标定残差均方差	0.225
x 方向互标定残差均方差	0.302
y 方向互标定残差均方差	0.270

(3) 误差来源分析

产生表 4.5 所示误差的来源有多种，主要误差源有标准点阵图像的制作误差、实际校正后对应点的计算误差、图像采集引入误差、校正系数计算误差、几何坐标校正计算误差等，其中前 3 种误差是影响校正精度的主要误差来源，这也是在以后研究过程中需要进一步改进的。

对智能作战机器人探测子系统在图景扫描过程中采集到的畸变数字图像进行有效校正是正确识别目标的重要前提。针对传统的图像畸变校正算法建模复杂、实时性差且图像信息易丢失等缺点，提出了一种基于四边形分片逼近控制点机理的图像畸变校正算法。该方法以标准点阵图像作为测量目标，将数学形态学和滑动邻域操作相结合以确定畸变图像像素点质心，采用基于四边形分片逼近机理的方法来拟合高次多项式校正模型，运用两步一维线性灰度级插值向后映射算法确定输出图像中像素点的灰度，并将该算法通过编程后在探测子系统的硬件平台上予以实现。实验结果表明，校正一幅像素为 768×494 的图像所用时间仅为 0.036 s，畸变校正误差在 0.31 个像素以内，有效避免了边缘信息丢失、空洞及灰度失真等现象。通过对实验结果的进一步分析可知，所提出的基于四边形分片逼近控制点机理的图像畸变校正算法能较好地解决校正精度与实时性的矛盾，可满足探测子系统对全景图像进行拼接的实际需要，为强化其实用性创造了条件。

4.5　目标识别的理论研究与技术探索

准确、迅速地识别出敌洞库类目标是智能作战机器人发挥作战效能最基本、最关键的因素。但要在复杂的山体背景条件下采集到目标图像并将目标识别出来，还需要在目标识别理论和目标识别技术上展开系统研究，才有可能真正掌握洞库类目标识别的诀窍。虽然目前有关目标识别的理论与实践蔚然可观，但涉及洞库类目标识别的研究成果还属凤毛麟角。因此，必须结合洞库类目标的具体特征情况，有的放矢，在洞库类目标识别和目标定位的理论与技术方面进行深入、细致的研究，以便为正确识别目标、准确判断方位提供理论与技术支持，保障智能作战机器人顺利、可靠地遂行其作战使命。

4.5.1　目标识别的理论研究与技术探索

智能作战机器人是一种新概念武器，其作战依据是对敌洞库类目标的正确识别与准确定位。由于敌洞库类目标往往隐藏在山地之中，复杂的背景、多变的气候、变幻的光照都给目标识别带来困难。为了保证智能作战机器人能够看得见、认得清、打得准，就必须在目标识别理论与方法上另辟蹊径，根据智能作战机器人的功能特点和作战使命，选择合适的理论与方法，并在具体运用方面大胆创新，为智能作战机器人探测子系统履行其功能奠定理论与技术基础。

1. 目标识别概述

谈到目标识别的方法，应当述及模式识别。所谓模式识别，是指对表征事物或现象的各种形式的（数值的、文字的和逻辑关系的）信息进行处理和分析，以对事物或现象进行描述、辨认、分类和解释的过程，是信息科学和人工智能的重要组成部分。

模式识别的方法主要分为两种：决策理论方法和句法方法。决策理论方法首先将被识别对象数字化，变换为适于计算机处理的数字信息，之后进行预处理、特征提取和决策。而句法方法的基本思想是把一个模式描述为较简单的子模式的组合，子模式又可描述为更简单的子模式的组合，最终得到一个树形的结构描述。

模式识别方法的选择取决于问题的性质。如果被识别的对象极为复杂，而且包含丰富的结构信息，一般采用句法方法；如果被识别的对象不是非常复杂或不含明显的结构信息，一般采用决策理论方法。但这两种方法不能截然分开，比如在句法方法中，基元本身就是用决策理论方法抽取的。所以在应用中将这两种方法结合起来分别施加于不同的层次，常常能收到较好的效果。

从应用上看，模式识别可用于文字和语音识别、遥感和医学诊断等方面。

所讨论的洞库类目标的识别问题属于遥感探测技术领域里的应用问题，相比文字识别和语音识别，图像识别所包含的信息量十分巨大，因而不论是对识别系统的硬件，还是对识别系统的软件，都有着较高的要求。

如前所述，探讨的目标识别对象是公路隧道的洞口，比较而言，公路隧道断面的形状不是很复杂，也不含明显的结构信息，所以可考虑使用决策理论的方法。常用的方法有模板匹配、特征识别等，还有一种近年来发展迅速、用途广泛的统计模式识别方法。下面对上述三种方法进行简要阐述。

模板匹配是一种遍历式搜索法，它利用模板与待检测图像进行逐点比对，检测符合度最高的位置。该方法实现起来比较简单，缺点也比较明显，由于是进行逐点比较，再加上图像的旋转、缩放等，耗费时间较长，进行匹配的计算量很大。此外，该方法对模板的精确程度要求很高，对尺寸、方向变化及部分偏移也非常敏感。

特征识别是当前使用最为广泛的目标识别方法，其手段和形式多种多样，在机器视觉领域里有大量的特征识别算法得到具体应用。特征识别需要先对图像进行预处理，增强感兴趣的部分，尽量滤除干扰信息；之后再对目标进行特征提取。一般可采用边缘检测和相关运算法则来提取目标特征，将感兴趣的目标映射到特征空间，减少冗余信息，以便于分类；最后，对提取出来的部分进行决策。

统计模式识别的基本原理和主要依据是：具有相似性的样本在模式空间中互相接近，并形成“集团”，即“物以类聚”。其中的 BP 神经网络直接从观测数据（训练样本）学习，是一种更为简便、高效的方法，但同时它又是一种启发式方法，缺乏能够指导工程实践的坚实理论基础，而且该方法运算量庞大，对硬件要求高，运算较为复杂，具体实现起来有一定难度。

综合考虑智能作战机器人作战需求、整体功能、硬件性能、实用条件等因素，采用两种方法对洞库类目标进行识别，一种是模板匹配，另一种是特征识别，而特征识别将具体使用霍夫变换来检测洞库类目标的外形特征。

2. 模板匹配

（1）模板匹配简介

所谓模板，就是一幅已知的小图像。模板匹配就是在一幅大图像中搜寻目标，已知该图像中有要寻找的目标，且该目标同模板有着相同的尺寸、方向和图像，通过一定的算法可以在该图像中找到目标，并确定其坐标位置。

以 8 位图像（1 个像素由 1 个字节描述）为例（图 4.102），模板 T（有 $m \times n$ 个像素）叠放在被搜索图 S（有 $W \times H$ 个像素）上并进行平移，模板覆盖被搜索图的区域称为子图 S_{ij}。i 和 j 为子图左上角在被搜索图 S 上的坐标。搜索范围是：

$$\begin{cases} 1 \leqslant i \leqslant H-m \\ 1 \leqslant j \leqslant W-n \end{cases} \tag{4.29}$$

通过比较 T 和 S_{ij} 的相似性，可完成模板匹配过程。

T 和 S_{ij} 的相似性可用下式进行衡量：

$$D(i,j) = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} [S_{ij}(m,n) - T(m,n)]^2 \tag{4.30}$$

$$= \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}[S_{ij}(m,n)]^2 - 2\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}S_{ij}(m,n)\times T(m,n) + \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}[T(m,n)]^2$$

图 4.102　被搜索图 S 与模板 T

公式（4.30）的第一项为子图的能量，第三项为模板的能量，它们都与模板匹配无关。第二项是模板和子图的互相关，随（i，j）而改变。当模板和子图匹配时，该项有极大值，将其归一化，可得模板匹配的相关系数：

$$R(i,j) = \frac{\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}S_{ij}(m,n)\times T(m,n)}{\sqrt{\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}[S_{ij}(m,n)]^2}\sqrt{\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}[T(m,n)]^2}} \tag{4.31}$$

当模板和子图完全一样时，相关系数 $R(i,j)=1$。在被搜索图 S 中完成全部搜索以后，找出 R 的最大值 $R_{\max}(i_{\mathrm{m}}, j_{\mathrm{m}})$，其对应的子图 $S_{i_{\mathrm{m}}j_{\mathrm{m}}}$ 即为匹配目标。

模板匹配法是遍历式搜索方法，该方法的优点是实现起来比较简单，缺点是耗费时间长，进行匹配的计算量巨大，并且对于尺寸、方向变化及部分偏移等非常敏感。

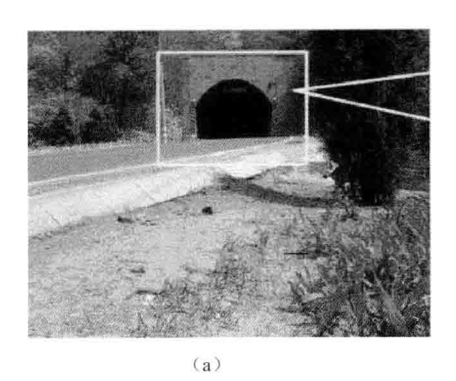
基于模板的匹配算法是常见的一种匹配算法，其实质是在整幅图中找出与模板差值最小的，即相似度最大的区域。在预先给定目标模板的情况下，把模板放在目标图像上逐点上下平移（有的还要求有旋转），相似度最大的区域就是要匹配的目标。

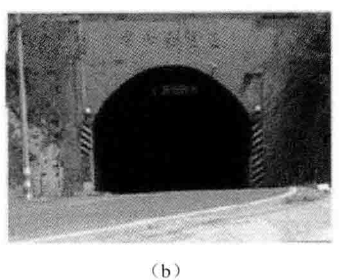
（2）模板匹配实现

如果所要识别的是某个已知目标，并有其相关图像资料时，可以考虑使用模板匹配的方法。使用模板匹配方法在距离 50 m 处对北京市“东方红”隧道进行识别和定位，如图 4.103 所示。使用该隧道洞口的图片为模板，与整幅图像进行匹配。

经过逐点匹配，找到了最符合整幅图像的位置，如图 4.104 所示，而图 4.105 则显示了匹配的相关度，峰值点对应处即为图 4.104 中图像的位置。

通过图 4.106 可以看出，经过模板匹配后的洞口与原图像能很好地结合在一起，准确度很高。





（a）　　　　（b）

图 4.103　被搜索图与模板

（a）被搜索图；（b）模板

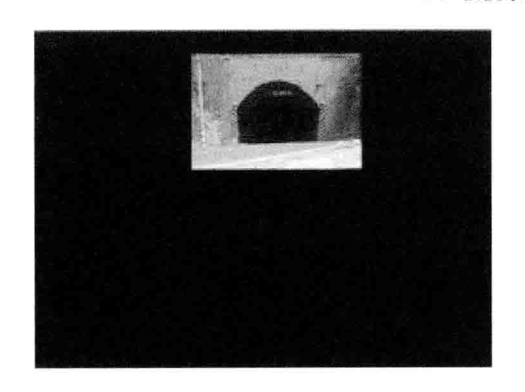


图 4.104　模板匹配位置

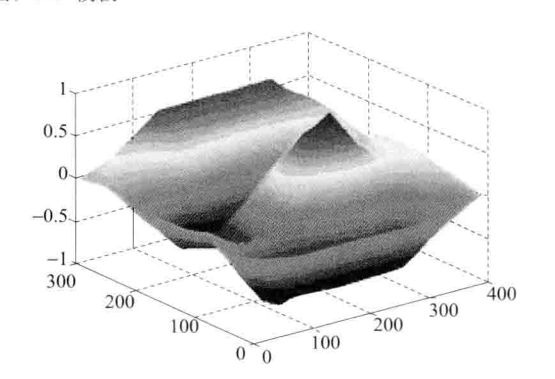


图 4.105　匹配相关度



图 4.106　匹配后的“东方红”隧道洞口图像

模板匹配适用于目标形状确定、距离适中的场所，但模板匹配对像素的变化较为敏感，在具体使用时需要视其周围环境和条件而定。

3. **霍夫变换**

(1) 霍夫变换简介

假设一幅图像中有 n 个点，现在希望找出位于一条直线上的所有点。这时，一种可行的方法就是先寻找所有由每对点确定的直线，然后找到所有接近特定直线的点组成的子集。解决该问题需要寻找 $n(n-1)/2 \sim n^2$ 条直线，并且对每个点要与所有直线执行 $(n)(n(n-1))/2 \sim n^2$ 次比较。显然，这种方法在实际操作层面上是不可行的，没有什么实用价值。

为了解决上述问题，霍夫（Hough）于 1962 年提出了一种替代方法，一般称为霍夫变换，其基本原理在于利用点与线的对偶性，将原始图像空间的给定直线通过曲线表达形式变为参数空间的一个点，其变换结果如图 4.107 所示。

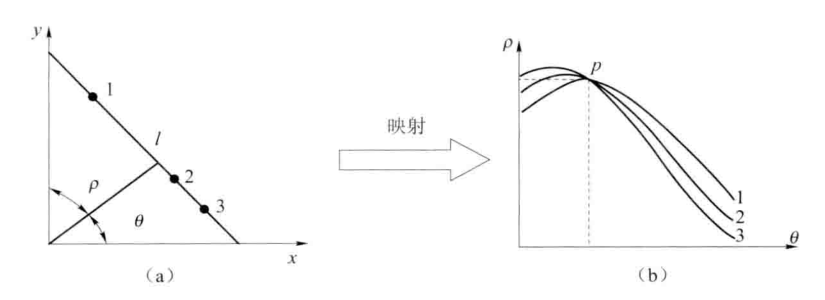


图 4.107　霍夫变换实现从图像空间到参数空间的映射

(a) 图像空间；(b) 参数空间

由图 4.107 可以看出，实施霍夫变换就能把原始图像中给定直线的检测问题转化为在参数空间中寻找峰值的问题，即把检测整体特性转化为检测局部特性。

设有直线 $y=ax+b$，其中 x 和 y 分别是自变量和函数，a 和 b 是参数。如果已知参数 a 和 b，则该点坐标之间的关系即可确定，上述方程可重新表示为：

$$b=y-ax \tag{4.32}$$

假设 a 和 b 是变量，而 x 和 y 是参数，则公式（4.32）表示的是(a,b)空间中的一条直线，斜率和截距由 x 和 y 决定。

现在考虑平面上的一个特定点(x_1,y_1)，过该点的直线可以有很多，每一条都确定了 a 和 b 的值，也就是说，每一条直线对应了 a，b 空间中的一个点，而这些点必须是满足以 x_1 和 y_1 作为常量时的等式的，因此，在参数空间中与 x，y 空间中所有这些直线对应的点的轨迹是一条直线，而 x，y 平面上的任一点对应了 a，b 空间的一条直线。如果有一组位于由参数 a_0 和 b_0 决定的直线上的边缘点，则每个边缘点对应了 a，b 空间的一条直线。所有这些直线必交于点(x_0,y_0)，因为这是它们共享的一条直线的参数，这样参数空间中直线的交点就对应着 x，y 空间直线上的一个点。

例如有 $a=3$ 和 $b=2$，则在直线 $y=3x+2$ 上取 A（1，5）、B（2，8）、C（3，11）、D（4，14）四个点，其情况如图 4.108 所示。

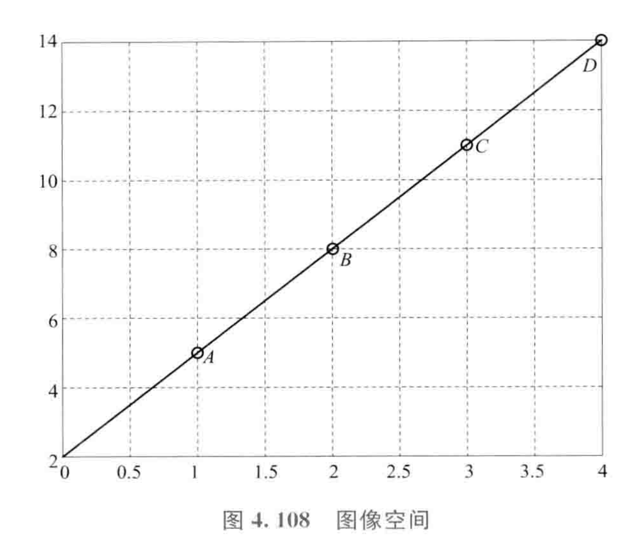


图 4.108 图像空间

现将 $x_1=1$，$y_1=5$；$x_2=2$，$y_2=8$；$x_3=3$，$y_3=11$ 和 $x_4=4$，$y_4=14$ 等代入上式，则在（a，b）空间可得 4 条相交于点（3，2）的直线，其情况如图 4.109 所示。为了找出这些点所构成的直线段，可将空间量化成许多小格，然后根据每一个点代入的量化值，算出各个参数值，所得值（经量化）落在某个小格内，便使该小格的计数累加器加 1，当全部点变换后，对小格进行检验，计数值大的小格对应于共线点，可用其作为直线拟合参数。计数值小的小格一般反映非共线点，应丢弃不用。

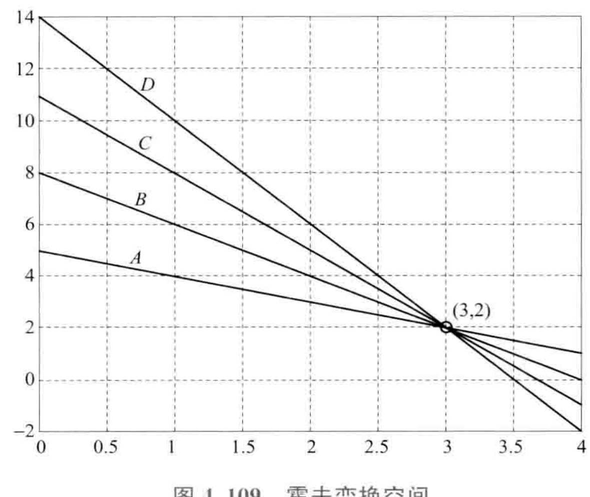


图 4.109 霍夫变换空间

如果量化得过粗，则参数空间的凝聚效果较差，找不出直线的准确值；反之，如果量化得过细，那么计算量将会增大，需要兼顾这两方面，去选择合适的量化值。若图像中各点是边缘点，而且梯度方向已经求出，在寻找有无直线边缘时，可在梯度方向内精细量化，其他方向角则粗略量化，这样在不增加总的量化小格数的情况下，可以提高检

测直线边缘的方向角的精度。

参数空间曲线的形状取决于用以表示曲线的原始函数，在实际中，常常使用直线的极坐标形式，而不是其显式表示，这样可以避免直线垂直时带来的问题。直线的极坐标方程表示如下：

$$\rho=x\cos\theta+y\sin\theta \tag{4.33}$$

在方程（4.33）中，点（x，y）被映射到空间（ρ，θ）上。

如图 4.110 所示，（x，y）空间直线上的 4 个点对应于参数空间（ρ，θ）上的 4 条正弦曲线，且所有直线都通过（ρ，θ）上的一点（2.818 7，0.634 6）。上述结果充分说明了霍夫变换的有效性。

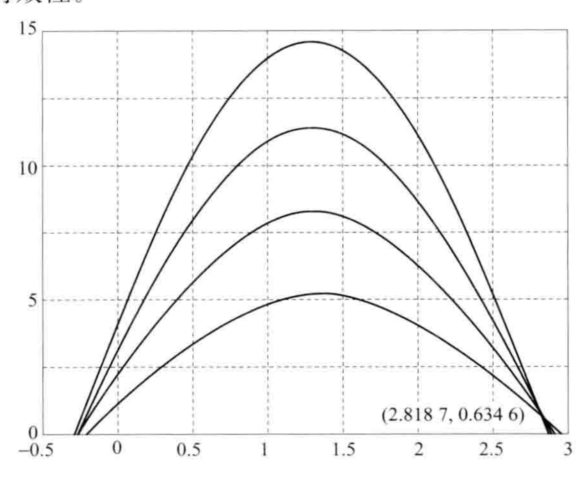


图 4.110　极坐标形式的霍夫变换

霍夫变换的主要性质有：

① 图像空间直角坐标系下的一个点在参数空间极坐标系下成为一条曲线；

② 图像空间直角坐标系下的一条直线在参数空间极坐标系下变成一簇有公共交点的曲线；

③ 参数空间极坐标系下的一个点对应图像空间直角坐标系下的一条直线；

④ 图像空间直角坐标系下的共点线映射到参数空间极坐标系下为一条曲线。

在实际应用中，常用 ρ 和 θ 等参数来描述直线，其中 ρ 表示原点到直线的垂直距离，θ 表示该垂线与 x 的夹角，这样，直线的参数方程为：$\rho=x\cos\theta+y\sin\theta$。这种方法比起用 k 和 c（斜率和截距）表示直线的方法有了很大便利，因为它解决了较大斜率无法表示的困难。霍夫变换由于具有一些明显优点和可贵性质，引起了国内外研究者的普遍关注，研究者们对霍夫变换的理论性质和应用方法进行了深入而广泛的研究，将霍夫变换的应用推广到了椭圆、圆、弧线等的检测中。

应当指出，霍夫变换抗噪能力强，有着很好的容错性和鲁棒性，但同时也存在运算量大的缺点。针对这些缺点，研究者们相继提出了四分树结构的霍夫变换、以梯度信息

为引导的霍夫变换、分层霍夫变换、自适应霍夫变换、快速自适应霍夫变换、随机霍夫变换（RHT）等许多改进型算法。

（2）霍夫变换识别目标

工程实验数据和图像处理中的二值边缘图通常都是些离散数据，因此，根据霍夫变换的性质，可按下述步骤实现变换：

① 将空间量化成 $m\times n$（m 为 θ 的等份数，n 为 ρ 的等份数）个单元，并设置累加器矩阵 $\boldsymbol{Q}_{m\times n}$。

② 给参数空间中的每个单元分配一个累加器 $Q(i,j)$，并把累加器的初始值置为零。

③ 取出直角坐标系中的点（x_i，y_i）（$i=1$，2，3，…，s，s 为直角坐标系中的已知点数）代入参数方程，并以量化后的 θ 值计算出 ρ。

④ 在参数空间中，找到 ρ 和 θ 所对应的单元，并将该单元的累加器加 1，即 $Q(i,j)=Q(i,j)+1$。

⑤ 当直角坐标系中的点都经过③、④两步之后，再检验参数空间中每个累加器的值，累加器值最大的单元所对应的 ρ 和 θ 即为直角坐标系中直线方程式的参数。

由上述霍夫变换的过程可知，如果参数空间中的 ρ 和 θ 量化过粗，则参数空间中的凝聚效果较差，找不出直线的准确参数 ρ 和 θ；反之，如果 ρ 和 θ 量化过细，那么计算量将增大。另外，当直角坐标系中的点分布在 R 条直线附近时，可在第⑤步检测累加器时，取出累加器中前 R 个值最大的单元所对应的 ρ_k 和 θ_k（$k=1$，2，3，…，R），以 ρ_k 和 θ_k 为直角坐标系中参数方程的参数，即可同时实现多条直线的拟合。

（3）霍夫变换的应用

1）检测直线

$X-Y$ 平面中直线上的各点经过霍夫变换会在参数空间中形成一簇有公共交点的若干曲线，该交点的坐标便是直线的几何参数。霍夫变换检测直线的结果如图 4.111 所示。

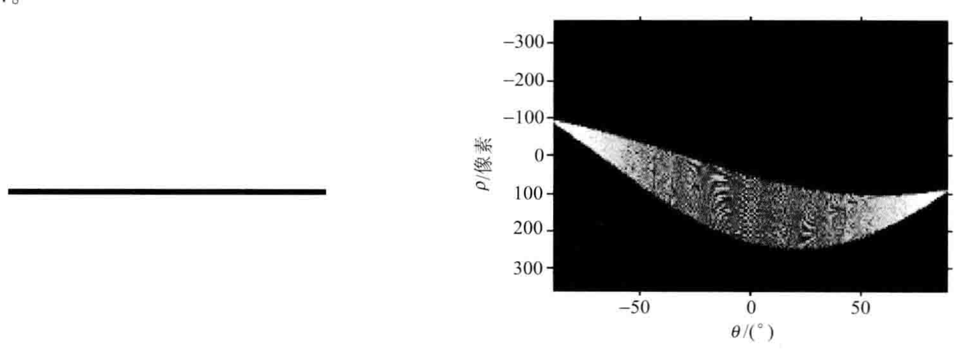


图 4.111 霍夫变换检测直线

2）检测矩形

矩形的几何特点是它由互相垂直的两组平行直线组成。那么，可以利用霍夫变换检

测直线的结果来判断图像中是否存在矩形图形以及有几个，并确定其参数。霍夫变换检测矩形的原理如图 4.112 所示。

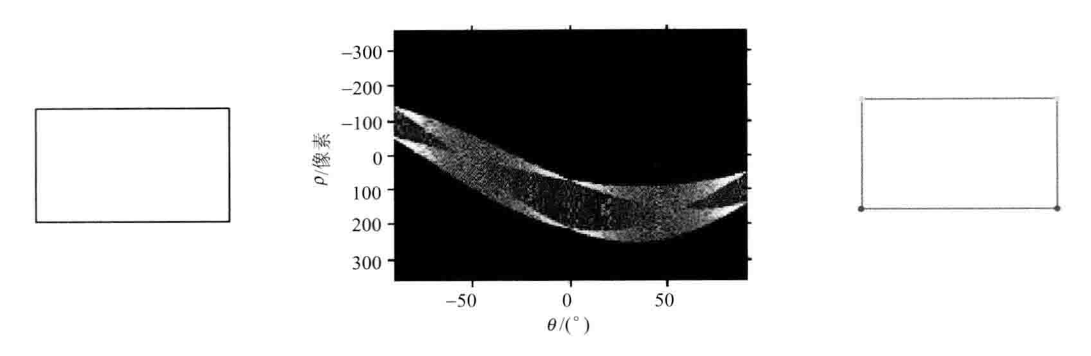


图 4.112　霍夫变换检测矩形

由图 4.112 所示霍夫变换结果可知，图中的四个峰值点表示原图像上有四条直线，且为两条相互平行的直线和两条相互垂直的直线，由这四条直线的参数能够轻松算出四个交点的坐标，即可获得该矩形的相关参数。类似的方法还可用于检测诸如梯形、三角形等由直线段组成的几何图形。

3）检测圆

在圆的半径未知时，圆的检测问题可以看作是“圆心”和“半径”两个参数的检测。这时，霍夫变换检测的原理仍然相同，只是参数空间的维数升高，计算量增大。

一个圆在直角坐标系下的方程为：

$$(x-a)^2+(y-b)^2=r^2 \tag{4.34}$$

其中，圆心为（a，b），半径为 r。

若用极坐标表示，圆的参数方程为：

$$\begin{cases} x=a+r\cos\theta \\ y=b+r\sin\theta \end{cases} \tag{4.35}$$

其中，θ 为极角。

图像空间中的任意一个点（x_0，y_0）都对应参数空间中的一簇圆曲线，即有：

$$\begin{cases} x_0=a+r\cos\theta \\ y_0=b+r\sin\theta \end{cases} \tag{4.36}$$

而参数空间中的任意一个点（a_0，b_0，r_0）则对应图像空间中的一个圆，即有：

$$\begin{cases} x=a_0+r_0\cos\theta \\ y=b_0+r_0\sin\theta \end{cases} \tag{4.37}$$

所以，如果图像空间存在一个圆或者圆的一部分，圆或圆弧上的点映射到参数空间中的曲线将会相交于一点，并且当参数空间中相交于这个点的曲线越多，那么说明图像空间中满足这个参数的圆形越饱满。通过划定一定的阈值，过滤掉干扰因素，就可以检

测出图像中的圆或圆弧来。

霍夫变换检测圆及圆弧的流程如图 4.113 所示。

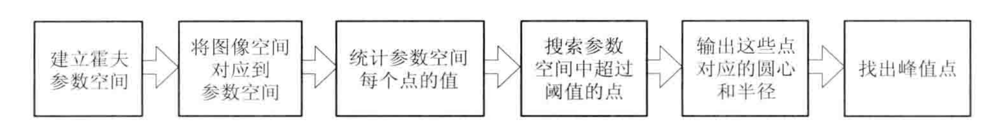


图 4.113 霍夫变换检测圆及圆弧的流程

在实际运用时，由于运算量很大，为了提高识别精度和速度，对每一幅图像进行降低像素的处理，使之变成 120×90 像素的图像，并且检测的半径也限制在 20～40 像素之间。首先采用 Sobel 算子对图像边缘进行提取，再检测其中的圆弧部分，除去其他冗余信息，最后给出圆心的位置和半径，为下一步目标定位做准备。图 4.114 和图 4.115 分别是将霍夫变换应用于隧道图像识别得到的霍夫变换图以及隧道检测的结果，由于图中存在许多不需要的细节信息，而这些细节信息中同样也存在直线，为了避免检测出不需要的直线而混淆检测结果，在霍夫变换时设置了只检测长度最长的线段的条件，因此，在图 4.115 中只标记了一条线段。

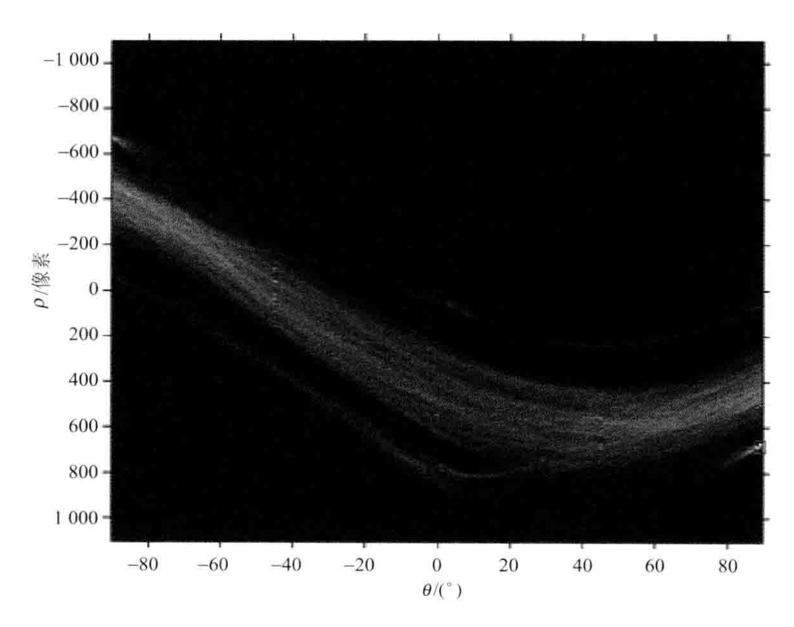


图 4.114 隧道检测的霍夫变换图

为了充分证明霍夫变换在洞库类目标识别过程中的有效作用，下面给出采用霍夫变换对北京“东方红”隧道在不同角度、不同距离所拍摄的照片进行圆或圆弧检测的结果，其中隧道正面的照片是实际拍摄场景，由于实地取景条件所限，其他角度的隧道图像来自仿真造型。结果如图 4.116～图 4.123 所示。

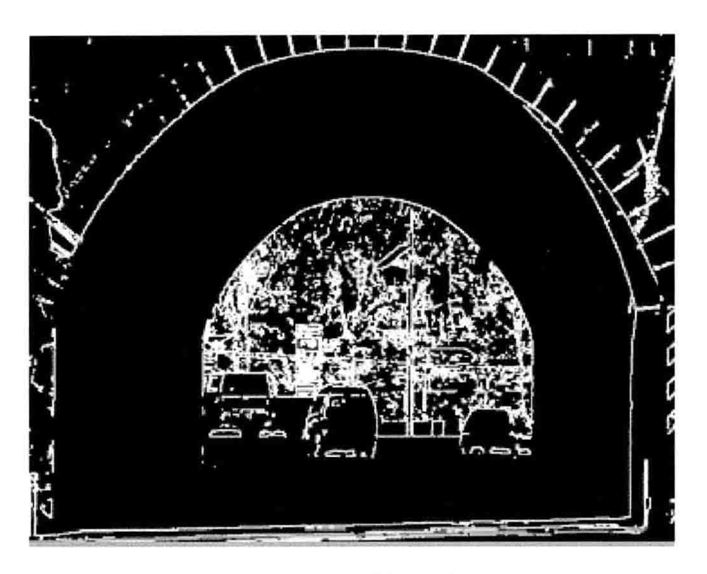
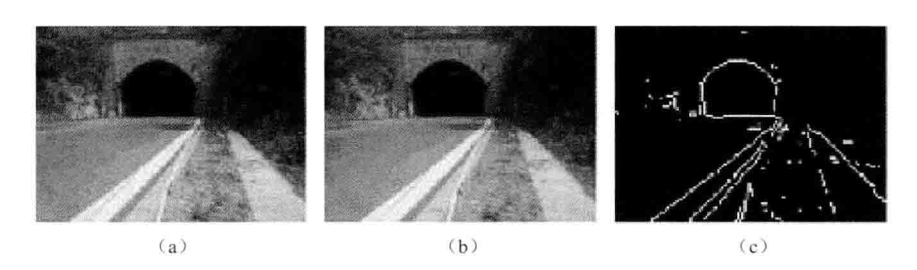


图 4.115　隧道检测结果

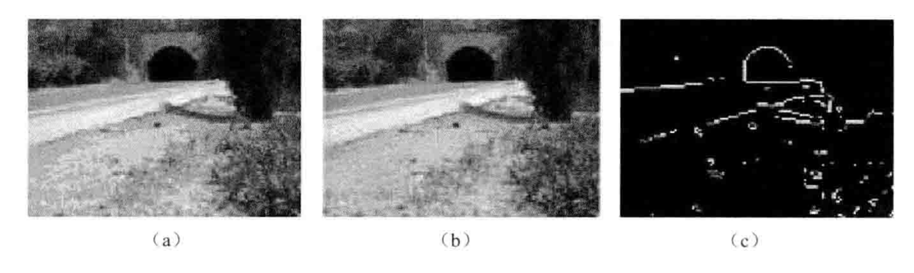


（a）　（b）　（c）

图 4.116　正面距离 30 m 处图像检测结果

（a）原始图像；（b）预处理结果；（c）边缘提取结果

圆心位置：（64，56）；半径：22（单位：像素）



（a）　（b）　（c）

图 4.117　正面距离 50 m 处图像检测结果

（a）原始图像；（b）预处理结果；（c）边缘提取结果

圆心位置：（18，88）；半径：30（单位：像素）

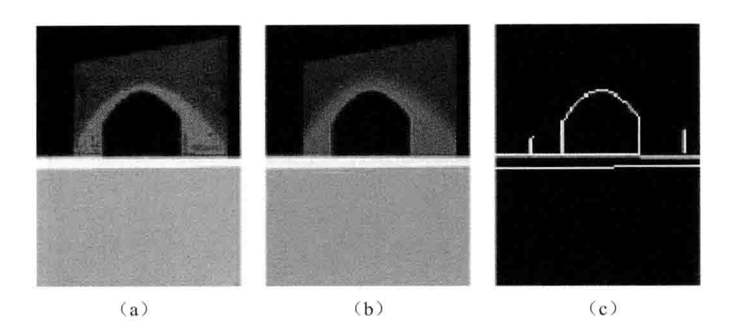


图 4.118　30°角、距离 30 m 处图像检测结果

(a) 原始图像；(b) 预处理结果；(c) 边缘提取结果

圆心位置：(56，57)；半径：28（单位：像素）

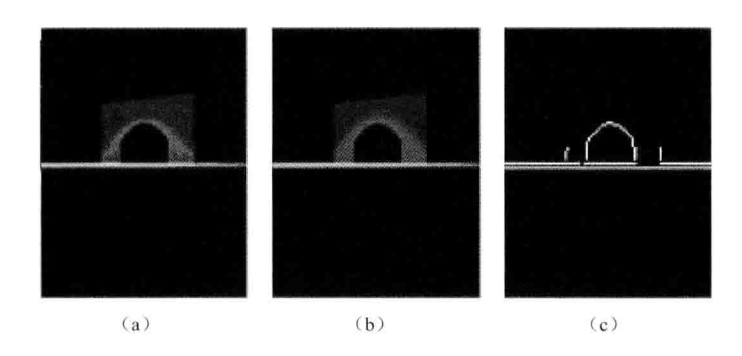


图 4.119　30°角、距离 50 m 处图像检测结果

(a) 原始图像；(b) 预处理结果；(c) 边缘提取结果

圆心位置：(78，50)；半径：30（单位：像素）

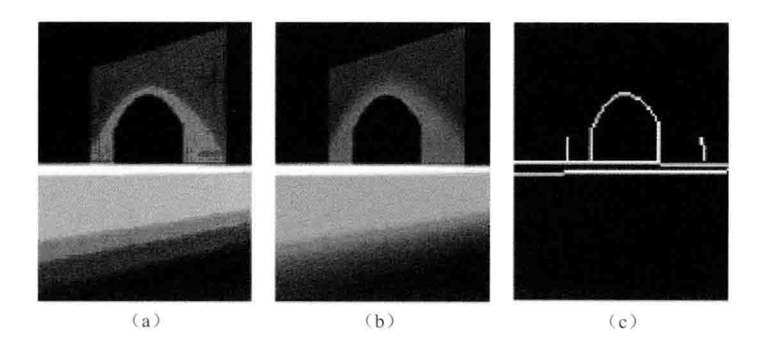
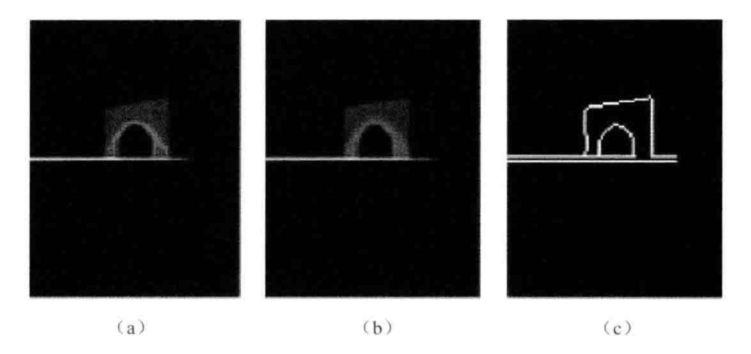


图 4.120　45°角、距离 30 m 处图像检测结果

(a) 原始图像；(b) 预处理结果；(c) 边缘提取结果

圆心位置：(54，59)；半径：26（单位：像素）

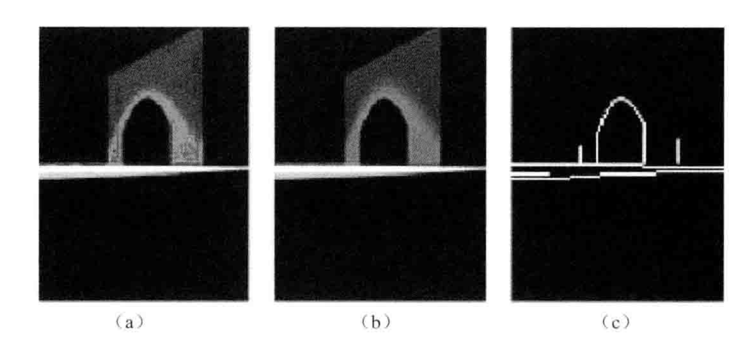


（a）　（b）　（c）

图 4.121　45°角、距离 50 m 处图像检测结果

（a）原始图像；（b）预处理结果；（c）边缘提取结果

圆心位置：（35，20）；半径：27（单位：像素）

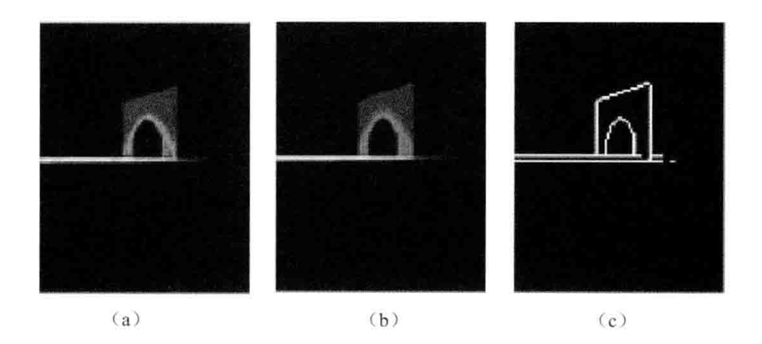


（a）　（b）　（c）

图 4.122　60°角、距离 30 m 处图像检测结果

（a）原始图像；（b）预处理结果；（c）边缘提取结果

圆心位置：（52，64）；半径：27（单位：像素）



（a）　（b）　（c）

图 4.123　60°角、距离 50 m 处图像检测结果

（a）原始图像；（b）预处理结果；（c）边缘提取结果

圆心位置：（33，29）；半径：30（单位：像素）

从上述检测结果可以看出，霍夫变换用来检测隧道洞顶圆弧的效果十分明显，由此表明，霍夫变换在洞库类目标的识别过程中可以发挥重要作用。但要注意的是，在预处理过程中应尽量除去干扰，还要适当降低像素，否则运算量会很大，从而影响目标识别的效率，而且还会带来无用信息的干扰。同时还可看出，对于隧道顶部圆弧的定位检测不够准确，需要在算法上进行改进。

4.5.2　目标定位的理论研究与技术探索

1. 目标方向定位

由图 4.42 所示智能作战机器人探测子系统的作业流程可知，初始化、全景扫描、图像预处理、目标识别、精确定位构成了该子系统的全部作业内容。在这些内容里，对目标方向的定位非常重要，它贯穿于智能作战机器人探测子系统的整个作业流程之中。

在子系统初始化环节中，需要记录开始采集图像的初始位置，包括底边位置和侧边沿位置，因为后续处理都要以此为基准进行偏移和记录。

在全景扫描环节里，装置在运动云台上的图像采集系统（即 VCM50 可见光/红外线智能探测器）在控制子系统的控制下做有序的水平转动和俯仰摆动，每隔一定角度采集一幅图像，系统将记录下开始扫描时的位置，经过畸变校正和全景拼接后，依照次序为每一幅图像编号，比如 A_1，A_2，…，A_n；B_1，B_2，…，B_n，扫描得到的图像如图 4.124 所示。

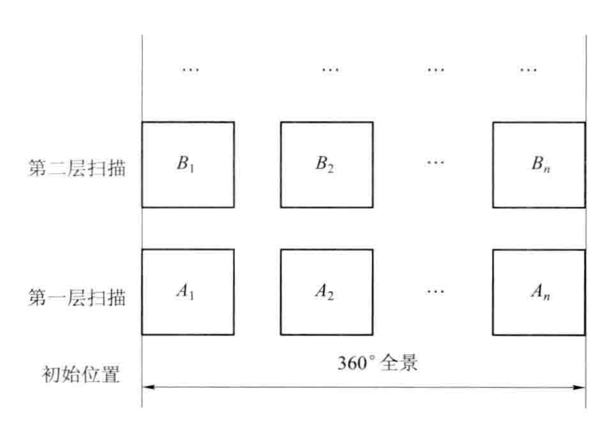


图 4.124　运动云台扫描得到的图像

运动云台每扫描一周即可获得 n 幅图像，每幅图像占 $360°/n$ 角。假设图像采集系统的扫描是自左向右进行的，第 i 幅图像的左侧边沿相对于初始位置就有 $360°/n$ 的偏移，要精确定位目标在水平方向上的位置，只需要计算出目标相对于该图像的位置即可。当需要扫描多层才能获得完整的周围环境图像信息时，若目标出现在第 j 层，就需要计算出第 j 层图像在竖直方向上的偏移，再加上目标相对于该层底边的偏移，计算方法与水平偏移时的计算相似。

需要说明的是，在图像预处理环节中，如不需要对图像的大小进行处理，则可以保持不变，直接进入下一环节；若因为处理速度和处理精度而需要改变图像的大小，则应当按比例调整其位置。

在目标识别环节中，目标的位置信息通过识别算法被提取出来，该目标的位置是相对于某一幅图像 i 的位置（m，n），其具体情况如图 4.125 所示。

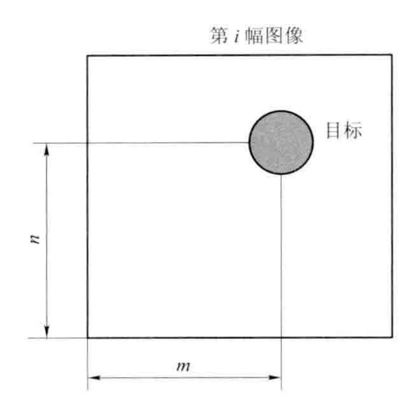


图 4.125　目标在一幅图像中的位置

在对目标进行精确定位时，由含有目标的图像的位置再加上目标相对于该图像的偏移量（m，n），即可得到相应的方位数据；同时，可根据对目标分析的结果进一步算出智能作战机器人到敌洞库类目标的距离。最后，根据所得数据计算出智能作战机器人执行下一作战步骤所需要的参数。

除上述定位方法以外，还有一种定位方法，该方法首先记录下第一幅图像的位置信息，然后将获得的图像作全景拼接，最后将全景图像作为一幅完整的图像进行处理。全景图像上的每一点对应外部环境的一个位置，目标的位置信息直接来自相对于全景图像的位置。该方法的优点显而易见，能够解决因目标分别处在几幅不同的图像中而无法识别的问题，而且处理流程简洁清晰。但采用该方法进行准确定位，首先要有足够准确的图像信息，所以，该方法对于全景拼接的要求较高。

2. 目标距离定位

在智能作战机器人探测子系统中，摄像头只有一个。由应用光学的知识可知，当一个宽度为 D、高度为 H 的物体 A 距离摄像镜头为 L 时，在视觉传感器（视觉传感器距离镜头为 l）上可得到一个宽度为 d、高度为 h 的图像 a（图 4.126），根据成像原理，这时可有：

$$\frac{H}{h}=\frac{D}{d}=\frac{L}{l} \tag{4.38}$$

视觉传感器上的像 a 与虚像 a′关于镜头中心对称。

在假设目标存在，并已知目标大小的情况下，由于 l 是一定的，那么到目标的距离为：

$$L=\frac{1}{h}\cdot H\cdot l \tag{4.39}$$

对于同一物体 A，高度 H 是不会改变的，于是根据相似性及其相关概念，目标到镜头的距离即与传感器上所获图像的高度成反比。根据其间的比例关系，只需要通过测量传感器上图像的高度就可以算出到目标的距离。

上述推理建立在假定所要识别的目标存在，且已知其大小的基础上。但智能作战机

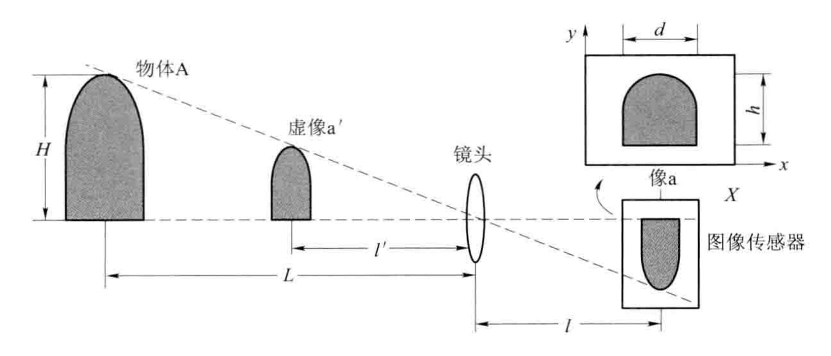


图 4.126 图像传感器成像示意图

器人探测子系统的任务是先判断目标是否存在，如果目标存在，再测量其位置，也就是说，对目标的认识是不完全的，既不知目标是否存在，也不知目标的实际大小。在这种情况下，单目视觉系统是无法精确得出到目标的距离的，而只能得到目标距离的一个大致范围。

由于视觉传感器上的像与所成虚像大小一致，故而不妨考虑图 4.127 所示情况，两个物体 A 与 B，假设其到镜头的距离不同，但是所成虚像大小一致。到镜头的距离分别为 L_a 与 L_b，由比例关系可得等式 $H_a/h=L_a/l'$ 和 $H_b/h=L_b/l'$。对于两个不同的物体，其对应的实际距离应该是 $L_a=(l'/h)\cdot H_a$ 和 $L_b=(l'/h)\cdot H_b$。也就是说，如果物体 A 和物体 B 分别代表了该类物体的最大和最小样本时，镜头到物体之间的距离应该在 L_b 到 L_a 之间。

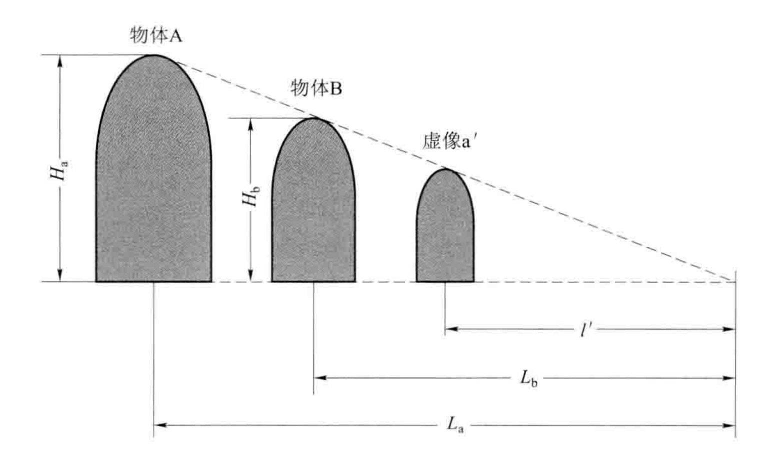


图 4.127 不同物体所成图像示意图

简单而有效的处理方式是将距离取为上述两者的中间值，得到一个估计值 L，即：

$$L=\frac{m\cdot L_a+n\cdot L_b}{2}=\frac{1}{2}\left(\frac{l'}{h}\cdot m\cdot H_a+\frac{l'}{h}\cdot n\cdot H_b\right)=\frac{l'}{2h}\ (m\cdot H_a+n\cdot H_b) \tag{4.40}$$

式中，l'由具体摄像头确定；H_a 和 H_b 为该类物体最大和最小的高度；m 和 n 为权重参数，由具体情况确定。

这样，物体到镜头的距离就可以通过测量传感器中像的高度来近似获得。误差将主要来自硬件本身，以及 H_a 和 H_b 的范围。

4.5.3　图像差分检测技术的研究与探索

图像序列能够反映场景的动态变化情况。场景中的物体运动、观测器运动或者物体与观测器的同时运动，是产生图像运动现象的原因。图像序列中的运动特征，能够用来检测其中的运动目标或计算目标的运动轨迹。在观测器运动而环境静止的情况下，又可以通过图像中的变化计算观测器在环境中的运动情况。

同样，图像中像素的变化也包含着重要的特征，这些特征可用于目标检测与目标识别。图像运动能够揭示物体的形状及其他特性，如运动速度或功能。对物体随时间运动的情况进行分析，可以说是研究工作的最终目标。

1. 洞库大门开关对图像变化的影响

在没有战情的情况下，藏有大型武器装备的洞库的大门一般是关闭的，但是一旦战情爆发，洞库大门需要打开，以便飞机等武器装备出去遂行作战任务。在这种洞库大门一闭一开的过程中，智能作战机器人探测子系统在同一位置采集到的两幅图像会存在很大的差异（假设周围环境没有变化），也就是两幅图像的灰度直方图不同，于是，应用两幅图像的差分可以检测出存在差异的区域，该区域很有可能是目标所在地。

2. 差分图像检测技术研究

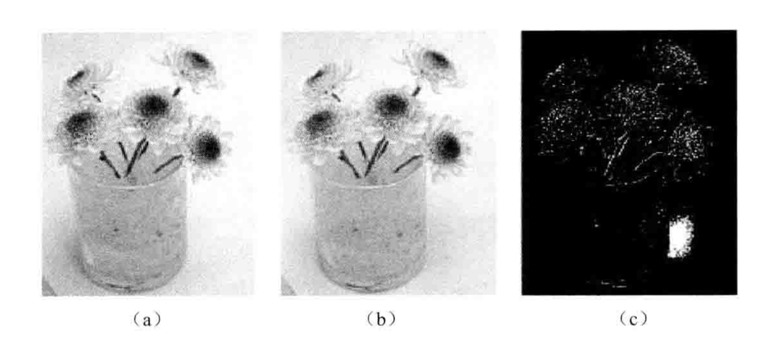
检测两幅图像之间变化最简单、最有效方法就是直接比较两帧图像对应相似点的灰度值情况，图像 $I(x,y)$ 与图像 $J(x,y)$ 之间的变化可用一个二值差分图像 $D_{ij}(x,y)$ 表示：

$$D_{ij}(x,y)=\begin{cases}1, & |I(x,y)-J(x,y)|>T\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{4.41}$$

式中，T 为阈值。

在差分图像中，取值为 1 的像素点被认为是物体运动或光照变化的结果。图 4.128（a）和图 4.128（b）所示为某一静物的两次拍摄结果，图 4.129（a）和图 4.129（b）分别是这两幅图像对应的直方图，从直方图中可以看出这两幅图像之间存在着差异，虽然单纯从 RGB 图像上很难看出前后两次拍摄的差异，但通过图像差分则检测出了两幅图像间存在着细微的差别，其差别情况如图 4.128（c）所示。这些差别既包括了由相机位移造成的相对物体移动（花枝的轮廓），也包括了由于光照不同而形成的图像差异（静物的阴影）。

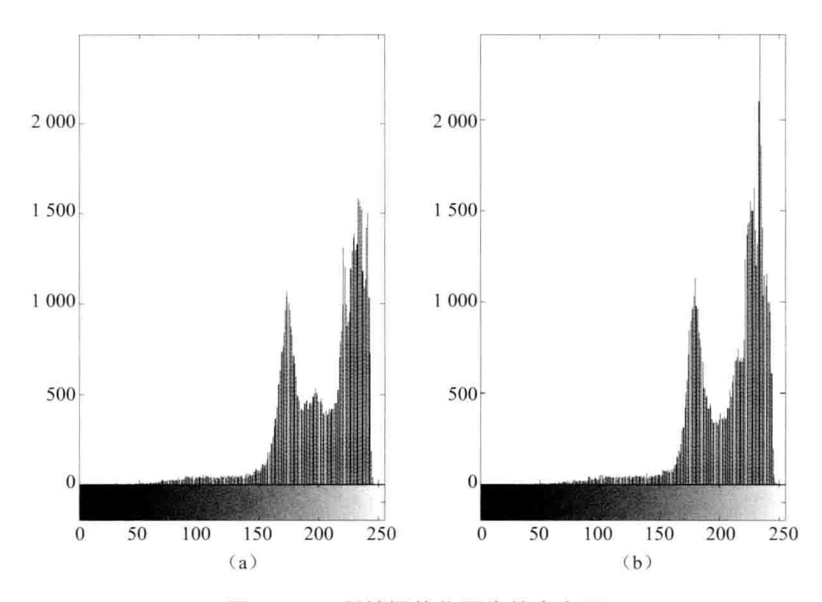
由以上图例可以看出，采用差分图像检测方法可以对洞库大门开关的状态变化作出准确的判断，由于洞库类目标所在山体在同时期的变化不会很大，因此，借助差分图像



（a）　　（b）　　（c）

图 4.128　静物图像差分检测效果图

（a）第一幅图像；（b）第二幅图像；（c）差分图像



（a）　　（b）

图 4.129　所拍摄静物图像的直方图

（a）图 4.128（a）的直方图；（b）图 4.128（b）的直方图

检测技术能够较为方便地帮助掌握洞库大门所在位置，这对智能作战机器人探测子系统进行目标识别和目标定位是有利的。

4.6　图像采集与目标识别的仿真实验及分析

智能作战机器人探测子系统的理论研究与技术探索是否取得预期成果还需通过验证实验加以检测和评价。这种验证实验应该构成一个较为完整的链环，应从探测子系统的初始化开始，逐次通过全景扫描、图像预处理、目标识别、精确定位等一系列作业流程，最后输出目标识别的结果和控制子系统所需控制信息，这样才能系统、全面、深入

地考察智能作战机器人探测子系统的工作能力，为继续提升与完善探测子系统的性能水平创造条件。

4.6.1 仿真实验硬件系统构成

仿真实验硬件系统的构成如图 4.130 所示。硬件系统中的相关元器件在前面已有详尽介绍，在此不再复述。下面将主要阐述仿真实验系统软件功能的实现途径与步骤。

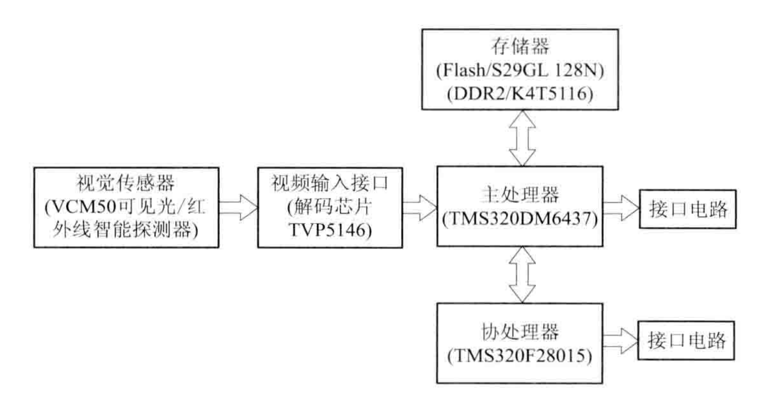


图 4.130 仿真实验硬件系统构成图

4.6.2 仿真实验软件功能实现

1. DSP 软件开发流程

智能作战机器人探测子系统采用双 DSP 芯片硬件结构，因而在 DSP 开发过程中，编写软件程序之前要先用 CMD 文件作为连接器命令文件，以实现存储器的空间分配，同时，CMD 文件也被用于定义段的地址以及向连接器说明与连接过程有关的信息。在此，汇编和连接器的目标文件可以采用 COFF（Common Object File Format）格式，这种格式使得模块化编程变得较为容易。它鼓励在用汇编语言或高级语言编程时采用基于代码段和数据段的概念，不必为程序代码和变量指定目标地址。这使得程序的可读性和可移植性得到增强，并为管理代码段和目标系统存储器提供了更加有力和更加灵活的方法。

为了更好地提高探测子系统进行图像采集和目标识别的实时性，在该子系统中应用了 CCS 的 DSP/BIOS 操作系统，为子系统的实时应用提供了底层软件，简化了子系统的软件设计，节约了开发时间和成本。同时，它的数据捕获、事件统计和事件日志功能在软件测试阶段与 PC 机 CCS 内部的分析工具 BIOScope 配合使用，可以完成对应用程序的实时探测、跟踪和监控，DSP/BIOS 使 DSP 的众多硬件配置变得直观和直接，许多用语言进行的设置在其中都可以轻松完成。

由于在 Windows 环境下，应用程序不能直接操作硬件设备，只能通过一个中间层

来读写控制设备，这个中间层就是驱动程序。驱动程序是管理某个外围设备的一段代码，提供连接到硬件设备的软件接口，是操作系统内核的一部分。

驱动程序共有 3 类，一类是 VDD（Virtual Device Driver），起源于 Windows 3.1 时代，用在 Windows 95/98/Me 操作系统中；一类是 KMD（Kernel Mode Driver），用在 Windows NT 中；还有一类就是 WDM（Win32 Driver Mode），用在 Windows 95/98/2000/XP 中，是美国微软公司推出的一个新的跨平台的驱动程序模型。

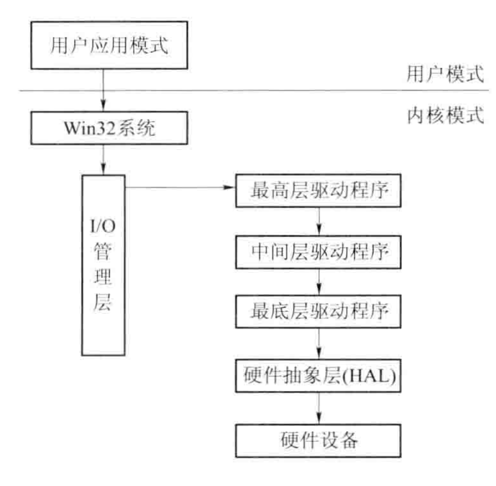


图 4.131 WDM 驱动程序体系结构

考虑到驱动的通用性和有效性，该仿真实验采用 WDM 驱动程序和 WDM 体系结构实行分层处理技术，将设备驱动分成高层驱动程序、中间层驱动程序、底层驱动程序。每层驱动再把 I/O 请求划分成更简单的请求，以传给更下层的驱动来执行。最底层的驱动程序在收到 I/O 请求后，通过硬件抽象层，与硬件发生作用，从而完成 I/O 的请求工作，其体系结构如图 4.131 所示。

目前，驱动程序的开发工具主要有 Microsoft 公司的 DDK（Driver Development Kit）、Jungo 公司的 Windriver 和 NuMega 公司的 Driver Studio。由于 DDK 是其他几种工具的基础，所以该仿真实验采用 DDK 进行驱动开发。具体开发驱动程序时，首先用向导生成驱动程序框架和所需的资源访问代码，然后实现 PCI 设备驱动程序的基本功能，如配置空间的访问、I/O 端口和内存的访问以及中断服务程序的实现等；最后通过使用创建文件函数打开设备文件，得到一个文件句柄，再通过调用设备控制函数就可以同设备驱动程序交换数据了，这样就实现了驱动程序的调用。在完成驱动程序的编写之后，就可以在 PCI 应用程序中进行调用以实现主机到 DSP 的数据传输。

PCI 应用程序主要是实现将计算机里面的图像数据实时地传输到基于 DM6437 的图像处理系统，是为了方便硬件调试和系统测试之用。一般而言，当 DSP 已经启动并进入等待中断状态时，主机只需向 DSP 发送中断信号，取得 CPU 使用权，便可在中断程序中进行数据的传输。该仿真实验的应用程序除了负责数据的传输之外，还可以实现对 DSP 的启动工作，因而还需完成对 DSP 相应模块的初始化，具体程序流程如图 4.132 所示。

2. 仿真实验软件流程图

在软件方案实现过程中，主要用 CCS 下的 C 语言和线性汇编语言执行图像预处理程序，并实现对目标的识别，其工作流程如图 4.133 所示。系统上电后，由 Flash 实现自举，并运行引导程序，进行系统初始化，然后系统进入等待，直到视频输入中断出现，系

统读入图像数据；接着调用图像预处理程序，最后将与识别结果对应的控制信息输出。

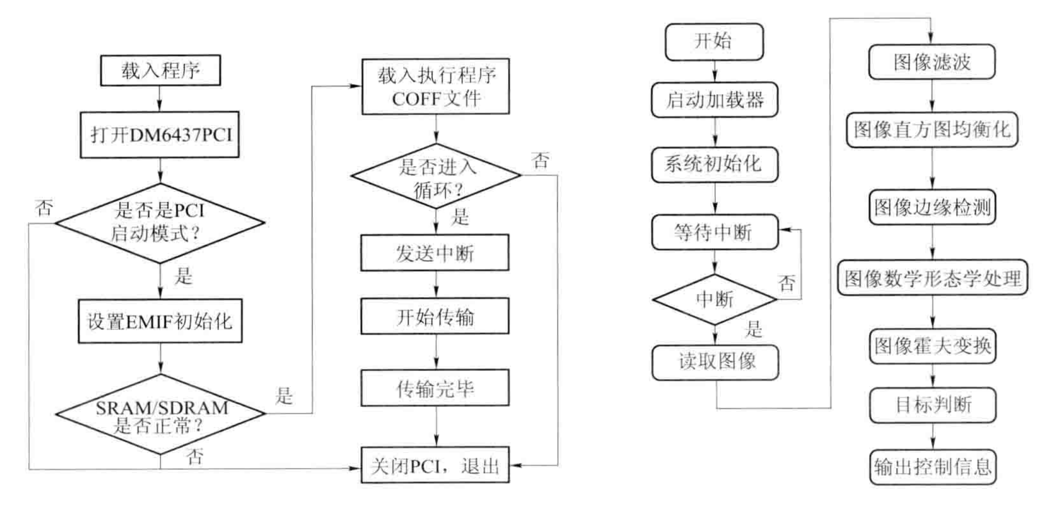


图 4.132　主机应用程序流程图　　　图 4.133　软件系统工作流程图

3. 仿真实验结果

为了尽可能真实、可信地进行验证实验，特地设置了专门的仿真洞库场景，并用架设在运动云台上的视觉传感器（VCM50 可见光/红外线智能探测器）经水平方向和垂直方向上的分幅（5 幅）、分层（4 层）扫描与拍摄，获得该仿真洞库的灰度图像和直方图如图 4.134 所示。

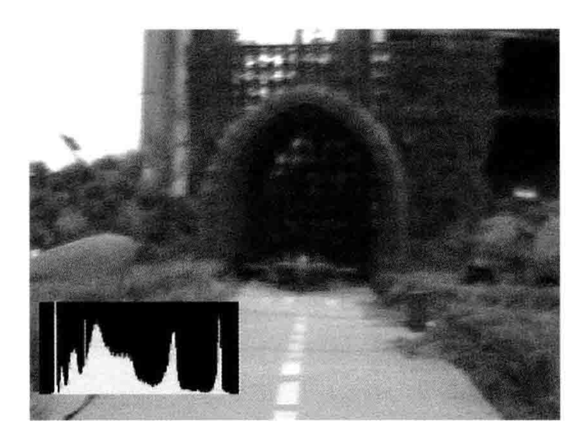


图 4.134　仿真洞库灰度图像及其直方图

需要说明的是，为了使扫描与拍摄工作进展顺利，在开始扫描与拍摄仿真洞库的灰度图像之前，先用 ICETEK－5100USB 仿真器对系统工作程序进行了仿真，确信系统功能正确无误，然后设置视觉传感器工作在红外方式，将视觉传感器连接到 DSP 的视频输入端子，并在 CCS 环境下编译程序，将 Debug 文件夹中生成的 .out 文件下载到 DSP 中。这些工作的就绪，使仿真洞库灰度图像的拍摄及其直方图的分析变得更加顺利和高效。

由图 4.134 可以看出，仿真洞库的原始图像模糊不清，其灰度值分布极不均匀，显然还需对其进行处理。图 4.135 所示为对仿真洞库原始图像进行直方图均衡化处理的结果，相比而言，这幅图像清晰了很多。

图 4.136 所示为将仿真洞库原始灰度图像进行中值滤波处理后的结果。为了突出对比效果，图 4.136 左下角区域是没有进行中值滤波处理的原始图像的一部分，其余区域

则是进行中值滤波后的图像。

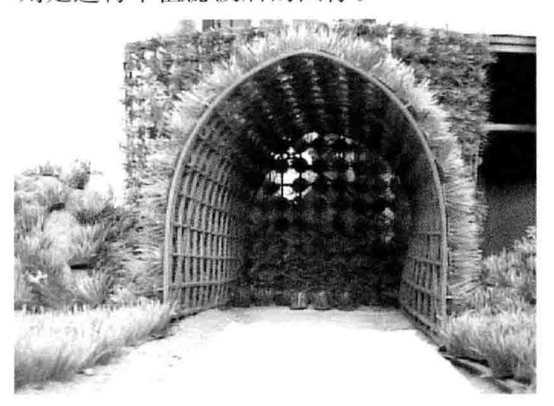


图 4.135 仿真洞库直方图均衡化后所得图像

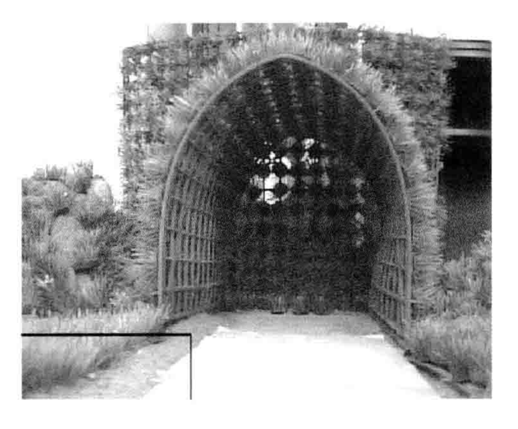


图 4.136 经中值滤波处理所得仿真洞库图像

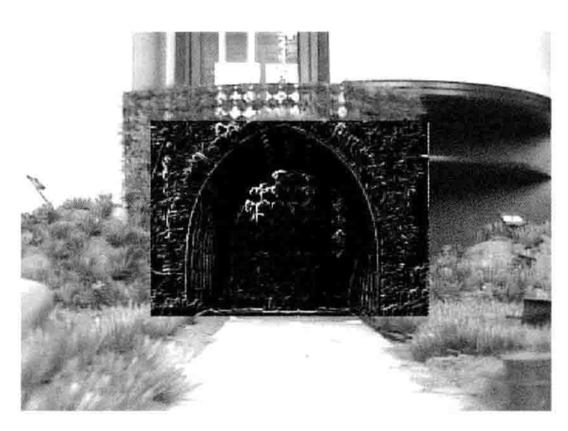


图 4.137 Sobel 算子进行边缘检测后所得仿真洞库图像

通过对比，可以清楚地看到，中值滤波突出了图像的细节。图 4.137 所示为采用 Sobel 算子对以上图像进行边缘检测后的结果。为了加快图像处理的速度，在此只对感兴趣的区域（图中黑色矩形框部分）进行了 Sobel 边缘检测。

图 4.138 所示为对仿真洞库进行洞门开/闭情况检测的结果，左边是仿真洞库洞门被遮挡（即洞门闭合）的图像，中间是洞门没被遮挡（即洞门开启）的图像，右边是用差分检测方法比较这两幅图像之间区别的图像，其存在区别的地方用蓝色区域标示出来。

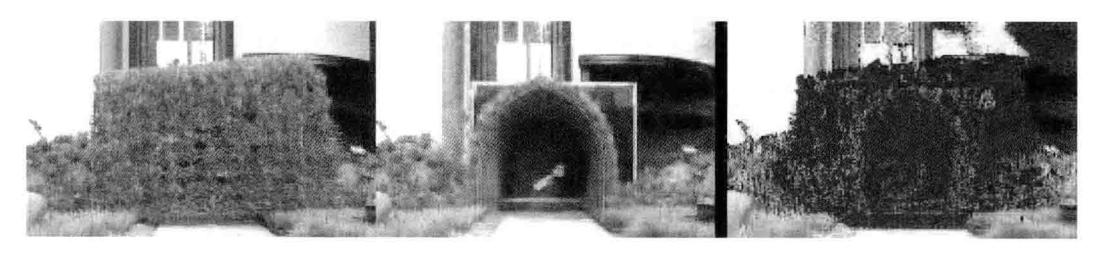


图 4.138 仿真洞库洞门开/闭情况差分检测效果比较图

由图 4.138 可以清晰地看出，采用差分检测运动图像的技术，可以确定洞库大门所在位置，滤除干扰信息，提高智能作战机器人探测子系统的目标识别能力。而且差分检测方法受光照的影响小，抗干扰性强，适合在智能作战机器人探测子系统中应用。

第 5 章　智能作战机器人系统相关辅助技术

智能作战机器人技术群中包含着伞降减速技术、火箭助推技术、性能分析技术、系统实验技术，等等。这些技术也是智能作战机器人系统研究的重要组成部分，是保证智能作战机器人在复杂、恶劣条件下完成预期作战使命必需的关键技术。通过计算机辅助分析与理论研究相结合、计算机辅助设计与工程研制相结合、计算机仿真模拟与实际测试相结合的方法和手段，在科学移植、系统融合相关技术及其成果的基础上，根据智能作战机器人的具体的战术指标和作战环境的实际影响因素，巧妙地对智能作战机器人系统辅助技术进行了系统研究和深入探索，取得了一系列研究成果，使智能作战机器人真正成为具有反洞库目标作战能力的武器系统。

5.1　伞降减速系统的设计与研究

智能作战机器人经多种运载工具或技术手段进行投放后，在预定弹着点上空 200 m 高度处打开战术布撒器，布撒出 3～5 个机器人，每个机器人必须依靠降落伞减速着陆，才能保护机器人内部装置的探测器件、控制器件、运动器件不因过大的冲击作用而失去其原有功能。因此，伞降减速系统对机器人能否发挥预期作战效力起着重要的作用，必须给予高度的重视。

5.1.1　降落伞相关理论的研究

1. 降落伞的分类

降落伞作为一种空中稳定减速器，其设计理论、制造技术与使用方法已经形成了独立的门类，在军事领域和灾难救援中占有非常重要的地位。由于降落伞使用广泛、种类繁多，其分类方法也各不相同。根据伞的用途和特点来划分，可以分为 3 类：一为人用伞，包括各种救生伞、伞兵伞、运动伞、备份伞等；二为物用伞，包括各种投物伞、航弹伞、回收伞等；三为阻力伞，包括各种飞行器着陆刹车伞等。从运用特点来划分，智能作战机器人的降落伞属于物用伞范畴，其结构形式和使用特点应参照物用伞类别的相关理论进行研究。

物用伞通常包含投物伞、航弹伞和回收伞等。其中航弹伞是空投各种航空弹所用降落伞的总称。航弹伞必须具备安全性、可靠性、航弹离机后降落时的稳定性并保证一定的空中滞留时间，以达到战术要求。开伞动载不超过航弹结构及其仪器仪表允许的承受

范围，伞的重量和体积应尽量小，并有良好的防霉和防潮性。伞衣织物必须满足在断裂强度、断裂伸长、透气量和重量等方面的要求，以及满足对环境的适应性、耐化学药物性、抗老化性、易缝纫性、耐压性、复原性和阻燃性等要求。

投物伞是用于空投物资装备用的降落伞。空投的物资多种多样，其重量差异很大，大的物品如卡车、大炮和坦克等。因此，伞用纺织材料要求强度高、质量小、弹性好，具有良好的化学稳定性、抗老化性、耐磨性、防灼性、易缝纫性和包装折叠性等。

回收伞的作用是保证回收物在完成飞行任务后能安全回到地面。它除了一般降落伞必须具有的减速、稳定、可靠、能安全着陆等要求外，还要求解决大过载、气动热、粒子辐射、包装容积限制等问题。因此，回收伞对降落伞所用纺织材料的强质比、耐高温、耐辐射性能有特殊的要求。为了使降落伞能在火箭、导弹、宇箭飞船等航天器的回收中发挥作用，必须提高伞衣的耐热性，故常用高熔点聚合纤维织物、金属纤维织物、陶瓷纤维织物等来制作伞衣。

2. 降落伞的设计原则

降落伞设计技术比较复杂，设计步骤也比较严格，设计时需注意以下原则：

① 尽量参考以前的相关设计经验，在明确降落伞的设计任务以及工作条件后，在现有的伞形中选择合适者。这样可以缩短设计周期，降低研制成本。如果没有合适的伞形可用，则需提出新的伞形设计方案。

② 在给定工作条件下，要保证降落伞开伞正常、使用安全、工作可靠。开伞程序设计的好坏是确保降落伞安全可靠性的关键，首要条件是确保开伞过程中伞绳拉直后伞衣才开始充气。

③ 拉直力、允许的开伞动载等性能参数不能超过规定指标。当拉直力和开伞动载不满足设计要求时，须采用减小开伞动载的方法加以处理。减小开伞动载的主要措施包括减小开始充气时的速度（可以采用延迟开伞、选用减速伞以及收口等方法）、延长充气时间和采用变透气量织物等。其他一些重要的性能指标如下降速度稳定性、空投重量、开伞速度、开伞高度等也必须满足规定的指标。

④ 一般降落伞均须保证下降稳定，但对稳定性的要求是依具体使用情况而定的。航弹伞对稳定性要求较高，对于人用伞、投物伞，则一般要求较低。满足稳定性要求必须在选择伞形时就要考虑，但稳定性的要求常常与助力系统要求有矛盾，必须在两者之间加以权衡。

⑤ 需尽量保证降落伞系统质量小、体积小，因此，进行降落伞设计时，必须选择合理的伞衣材料及安全系数，并设计合理的降落伞系统结构。

⑥ 不能忽视降落伞的缝制方法，以保证降落伞工艺性好、用料省、不易滑线、强度大和气密性好等要求。

5.1.2　降落伞类型的选择

依据智能作战机器人自身的功能特性和使用特点，要求其伞降减速着陆系统能够保证机器人能以较低的降落速度（不高于 7 m/s）和较小的偏移速度（不大于 1 m/s）来保证自身机体的安全性和着陆地点的准确性。为了满足这些要求，智能作战机器人的降落伞就必须兼具航弹伞和回收伞的主要特性。

智能作战机器人的降落伞必须如航弹伞一样，具备安全性、可靠性、航弹离机后降落时的稳定性。开伞动载不能超过智能作战机器人内部结构及其探测器件、控制器件和运动器件所允许的承受能力，伞的质量和体积需尽量小，对伞衣织物则要求满足断裂强度、断裂伸长、透气量和质量等指标要求。与此同时，智能作战机器人降落伞必须如航天回收伞一样，满足减速、稳定和能安全可靠着陆的性能要求，并且对降落伞的包装容积也有着严格限制。因此，对智能作战机器人降落伞所用纺织材料的强度质量比值以及伞绳材质、缝制工艺也有着特殊的要求。

5.1.3　降落伞组件的确定

由航弹伞和航天回收伞的相关设计理论知识可知，智能作战机器人降落伞主要组成部分应包括引导伞、伞衣套、伞绳、伞衣和伞包等，各部件作用如下：

① 引导伞的作用是在伞系统拉直过程中，将伞系统从伞包中拉出、拉直，并从伞衣上拉脱伞衣套，使伞系统处于良好的工作状态。

② 伞衣套的作用是保护伞衣，使伞衣底边在系统拉直前不与气流接触，防止伞衣提前充气，用以保证伞衣伞绳有良好的拉直程序，避免或减少伞绳抽打伞衣的概率。

③ 伞绳连接伞衣和背带系统，它是伞衣的骨架，在开伞过程中起着平衡和缓冲的作用，要求伞绳具有轻薄、柔软、强度高、弹性好、伸长不匀率小等特点。

④ 伞衣是伞系统的主要组成部分，由它产生下降阻力，起减速和稳定作用。伞衣上缝制有多条伞带，伞带采用双层或三层织物的厚型带，具备很高的强度和断裂功。

⑤ 伞包用以包装伞衣、伞绳、伞衣套、引导伞等降落伞所有部件，使之保持一定的几何形状，并保证伞衣等部件在工作中不受气流吹袭且不与其他物体钩挂。在智能作战机器人中，降落伞伞包由降落伞伞舱代替。

此外，降落伞各组件均用特殊伞线缝制，伞线是缝合降落伞绸、带、绳各部件的连接材料，应具有强度高、润滑好和捻度均匀稳定的特点。

5.1.4　降落伞的伞衣形式及材料

1. 降落伞伞衣类型的选择

在智能作战机器人降落伞组件中，最为重要的是伞衣，因为伞衣的结构形式及其尺寸大小不但直接影响机器人的降落速度、加速度，对降落伞摆动角度、降落稳定性也起

着关键作用。

一般而言，降落伞伞衣按结构形式可分为以下 4 种：

① 圆形伞：包括平面圆形伞、底边延伸形伞、锥形伞、气动幅锥形伞等。

② 方形伞：方形伞衣的平面图形为切去四角的正方形。

③ 导向面伞：包括有肋导向面伞、无肋导向面伞、人用导向面伞等。

④ 带条伞：包括平面圆形带条伞、环缝伞、波环伞、环帆伞、锥形伞等。

对于智能作战机器人来说，其降落稳定性是伞衣选择的首要依据，主要原因如下：

① 由于降落伞解脱机构是利用机器人着陆时沿弹体纵向的冲击力，使基座承重压缩弹簧产生压缩变形，导致支撑板挂钩从发射筒卡槽中解脱出来，释放了伞舱压缩弹簧的弹性恢复力而完成降落伞解脱的，如果着陆时倾角过大，将会减少两组弹簧的压缩量，致使降落伞解脱及支撑板展开功能失效。

② 一旦着陆时弹体倾斜程度过大，将导致弹体重心严重偏移，弹体自身重力将超过支撑板展开时的极限扶正力，使智能作战机器人无法进入后续正常工作环节。

③ 如果机器人着陆时基座与地面的倾角过大，会使着陆接触面变小，对基座的瞬间冲击力将大幅提高，从而导致基座严重受损。

④ 大的摆动角在机器人撞击地面时将产生大的横向加速度，这种加速度可能使机器人基座或内部的探测器件、控制器件和运动器件受到严重损坏。

因此，根据降落伞主伞伞衣的分类形式，通过反复斟酌，选择摆动幅度最小的稳定型导向面伞来构筑智能作战机器人伞降减速系统。

2. 降落伞伞衣材料的选择

降落伞中 2/3 的材料是由纺织材料构成的，降落伞的性能与纺织材料密切相关。在降落伞应用领域，纺织材料已逐渐形成一个独特的门类。降落伞所用纺织材料最初采用蚕丝、长绒棉和优质麻，后被锦纶丝所取代。随着芳族聚酰胺纤维凯夫拉—29 纤维及超高相对分子质量聚乙烯纤维的出现，降落伞的性能得到不断提高和加强。降落伞所用织物的性能除受纤维材料影响外，在很大程度上还取决于织物的组织结构，通常会采用平纹组织增加经纬密度或是在平纹组织的基础上加用较粗的纱线在织物上形成格子外观等办法来提高织物的强度和抗撕裂性能，并改善手感。

从降落伞制造水平、制作工艺及生产成本等角度考虑，采用最为常见的锦纶（尼龙）产品——锦纶 6 和锦纶 66 作为降落伞伞衣材料，其性能特点如下：

① 成分：100%高强锦纶。

② 规格：33DX33D 防撕裂组织。

③ 染色克重：33±4GSM。

④ 幅宽：150 cm，长 15 m。

⑤ 颜色：黄色。

⑥ 后期处理：采用织机喷制，背胶涂层，使材料具有耐日晒、抗撕拉、质量小、强度高的特点。

⑦ 单位面积质量：42 g/m^2。

5.1.5　降落伞具体参数设计

根据此前对智能作战机器人一代原理样机内部结构、外部尺寸、总体重量的设计与确定，智能作战机器人降落伞设计参数及相关要求可归纳如下：

① 智能作战机器人外观呈圆柱体，直径为 200 mm，高为 450 mm，质量为 15 kg。

② 机器人抛投高度为 200 m，抛投环境为野外开阔地。

③ 降落过程中，降落伞稳定下降速度要求小于 10 m/s，着陆角大于 70°。

④ 着陆后，降落伞不能遮盖机器人。

为了满足上述要求，对降落伞主伞进行了设计。降落伞主伞是影响机器人降落情况的最主要部件之一，它对机器人降落速度、降落稳定性起着关键作用。

根据降落伞降落相关经验公式，降落伞未达到稳定降落速度前的升力计算公式为：

$$L=\frac{1}{2}\rho C_{\mathrm{L}}\pi R^2 v^2 \tag{5.1}$$

式中，ρ 为下降速度对应高度上的空气密度（一般指地面空气密度），在标准状态下，干燥空气的密度为 1.293 kg/m^3；C_{L} 为伞衣阻力系数（应根据伞形、伞衣材料、透气量的具体情况选择）；R 为降落伞伞衣半径；v 为物体相对气流速度。

根据使用条件，设计出降落伞主伞的类型，其相关参数如下：

① 伞衣直径为 3 500 mm，侧面呈大于半圆形状，底端圆直径小于最大截面圆直径。

② 顶部开有直径为 150 mm 的通气孔。

③ 使用 12 或 16 根伞绳，伞绳自由段长度为 4 m。

④ 伞衣总质量为 0.3 kg。

相关参数具体情况如图 5.1 所示。

当物体在空气中以速度 v 飞行时，所受气动阻力：

$$D=\frac{1}{2}\rho v^2 C_{\mathrm{d}} S \tag{5.2}$$

式中，C_{d} 为阻力系数；ρ 为大气密度；v 为物体相对气流速度；S 为物体相对气流的正投影面积。

为验证降落伞主伞参数设计的合理性，利用相关尺寸参数在 Adams 仿真软件中对降落伞主伞进行了仿真建模，并通过设置上述函数表达式模拟不同方向的风速、相对空气阻力对降落伞降落过程的影响，模仿机器人具体着陆过程，为降落伞的改进设计提供可靠依据。

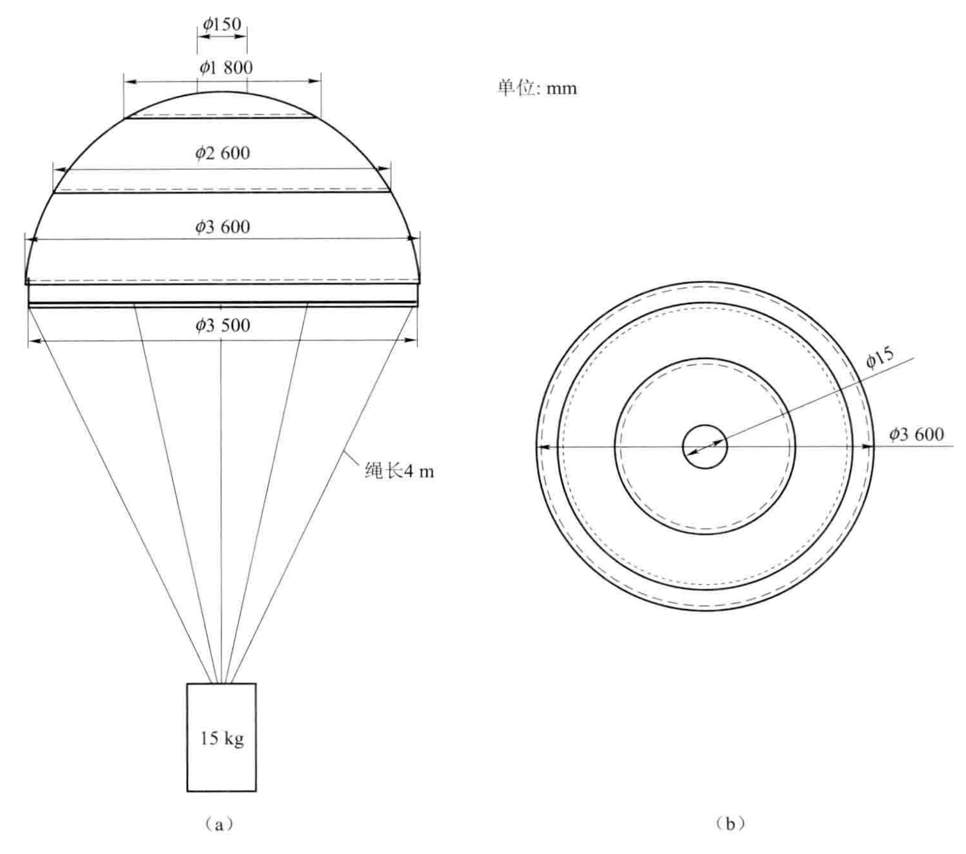


图 5.1 稳定型导向面降落伞简图

(a) 伞衣主视图；(b) 伞衣顶部视图

5.1.6 降落伞仿真分析

1. 降落伞降落过程分析

降落伞的降落过程一般可分成以下 4 个阶段：

(1) 自由坠落阶段

这是指降落伞从抛投到打开伞包的自由坠落阶段，这一过程延续的时间称为自由坠落时间。自由坠落时间即开伞时间，一般的开伞时间为 1～3 s。在这一阶段中，降落伞承载物在打开伞包时的速度，通常称为开伞速度，这个速度的变化是由承载物受到的空气阻力引起的。

(2) 拉直阶段

这是指引导伞从伞包内抛出到伞衣和伞绳全部拉直的阶段，所占用的时间叫拉直时间。伞包打开后，引导伞迅速充气张满，立即减速，此时承载物仍在快速下降，因而引导伞和承载物之间产生速度差，使引导伞落在承载物后面，引导伞通过连接绳将主伞的

伞衣和伞绳逐渐全长拉直。在伞衣和伞绳全长拉直瞬间，系统所具有的速度称为拉直速度。拉直速度也就是伞衣开始充气时的速度。由于引导伞和承载物之间存在速度差，在全长拉直瞬间，速度差突然消失，此时承载物将承受一个突加的载荷，称为拉直力。

(3) 充气阶段

这是指从伞衣、伞绳全部拉直到伞衣全部充满的阶段。在伞衣和伞绳全长拉直后，主伞开始充气。在主伞充气过程中，由于空气阻力急剧增加，系统的速度迅速地由拉直阶段对应的速度减小到主伞完全充满时对应的速度，这一瞬间的速度称为充满速度，充气阶段所占用的时间称为充满时间。在充气过程中，由于系统突然减速而产生的作用在承载物身上的载荷，叫作开伞动载。从打开伞包到伞衣完全张满所需要的时间称为开伞时间，显然开伞时间等于拉直时间加上充满时间。

(4) 稳定阶段

这是指伞衣充满到稳定下降的阶段。伞衣充满瞬间，由于惯性影响，系统还来不及减速，此时系统阻力大于系统重力，从而产生减速度。在这一阶段才把速度减到使系统所产生的阻力等于系统重力，这时的速度称为稳定下降速度。因此，如果主伞刚充满，不经过稳定阶段就落地，那么就不能保证安全。为了确保承载物的安全可靠性，要求稳定阶段至少有 2～3 s 的时间。

采用 Adams 软件进行降落伞降落特性的仿真分析，重点模拟的是降落伞降落的稳定阶段。在降落伞降落的稳定阶段中，由于降落伞自身重力和伞面阻力的相互作用，经过姿态调整和减速降落，当伞面空气阻力的方向调整到与重力方向几乎相反，力的大小几乎相等时，降落伞系统就会保持稳定速度而落向地面。这个稳定速度值的大小与其自身重力、空气密度、伞面面积等诸多因素有关。实际上，降落过程的仿真分析通常都不包含伞的拉升、充气阶段，其主要研究目标是伞张开后稳定降落阶段的静力学及动力学仿真。

2. 降落伞仿真分析方法

合理搭建降落伞虚拟样机是降落伞仿真分析的关键，建模方法的好坏直接影响仿真结果的有效性。目前利用 Adams 软件进行降落伞降落特性仿真分析主要采用下述三种方法。

(1) 变空气阻尼力分部设置法

该方法广泛用于带减速伞装置的航空炸弹的弹-伞系统降落过程动态特性分析。由于把伞视为柔性体时，Adams 中伞的装配建模及伞在风力因素影响下的变形与运动都将变得更为复杂，难以通过计算机系统进行仿真分析。因此，采用该方法进行建模及计算时，假设伞衣及伞绳均为刚性体，降落伞打开后不变形，并且将空气阻尼力载荷分为三个部分进行模拟：一是作用于主伞的降落伞减速阻尼载荷；二是始终作用于弹体的空气阻尼力载荷；三是在降落过程中风速等环境因素产生的空气阻尼力载荷。由于伞面空气阻力的大小是一个随速度变化的变量，其方向也是一个随速度变化的变量，同时弹的

降落速度又是受伞面空气阻力影响的，显然这是一种闭环反馈关系，而此联动特性可以借助 Adams/View 中的运行阶段函数功能实现。

该方法的优点是：对空气阻尼力载荷进行分布设置，可以分析在特定风力影响下的弹-伞系统，并且利用 Adams 软件中的阶段函数功能可以更加真实地反映降落过程中不同变量之间的联动关系，使仿真结果具有可信度和有效性。该方法的缺点是：把降落伞与伞绳看作刚性连接体，忽略了伞及伞绳作为柔性体对降落过程的影响，模型过于简单（图 5.2 和图 5.3），仿真效果不甚理想。

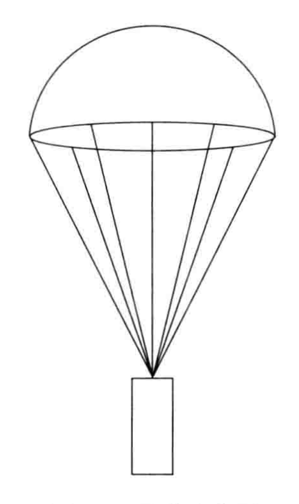


图 5.2 降落伞模型

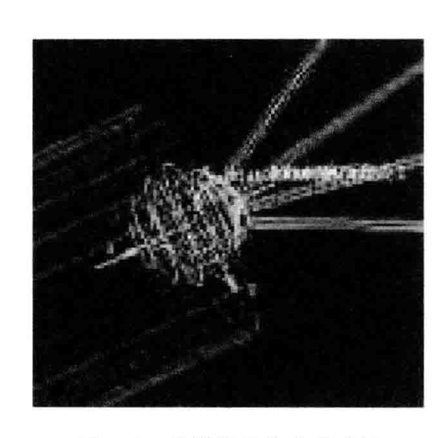


图 5.3 虚拟样机部分示意图

（2）质点与弹簧建模法

在降落伞降落过程中，伞衣表面承受着张力，由于伞衣结构所具有的几何形状，在缝合部加强带之间的伞衣向外鼓出，伞衣织物的张力沿着织物的经纬纱传递到最近的边界构件上，最终表面上的载荷集中在伞衣底边的伞绳连接处，并经过伞绳和吊带继续往下传递，最后传到回收物的吊索上。根据力传递路线的分析，将降落伞系统的质量以质点的形式集中于各连接点，质点与质点间用弹簧连接，通过 Adams 建立伞系统降落过程的模型，从而可以对降落伞系统受力情况进行分析。具体方法如下：

① 伞衣的整体质量可用伞衣的底边和顶部两部分质量表示（图 5.4）。将伞衣底边质量用 12 个质点（m_1，m_2，…，m_{12}）沿伞衣口圆周等距表示，这些质点的质量由伞绳的一半质量和伞衣底边的质量组成，伞衣顶部质点 m_d 代表伞衣质量，降落伞承载物的质量 M_f 则由承载物和一半伞绳的质量组成。

② 质点之间用弹簧连接，而伞衣顶部用一个集中质点表示，伞衣顶部质点与伞衣口处 12 个质点之间也用弹簧连接。根据降落伞及弹簧属性相关资料确定伞绳的弹簧刚度。

③ 降落伞承载物的质量用一个集中质点 M_c 表示。

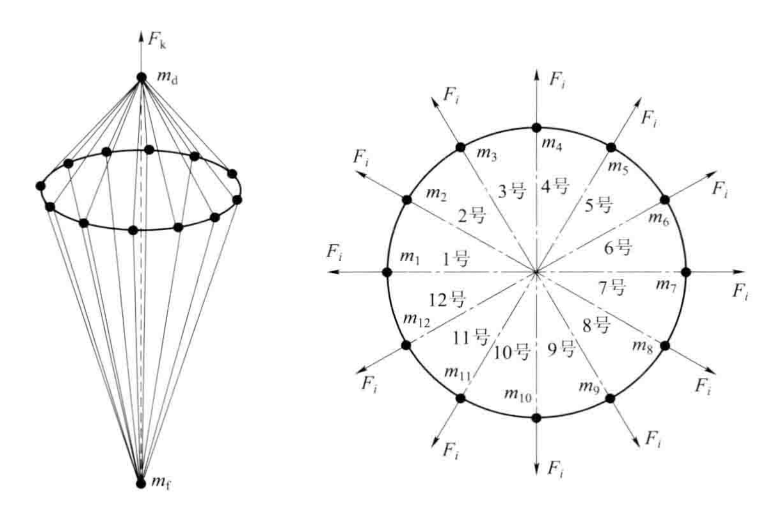


图 5.4　降落伞结构图

④ 各质点之间是用织物（伞绳、伞衣、连接带、加强带等）相连的，在 Adams 中将这些织物假设为弹簧模型。

⑤ 在伞衣顶部施加开伞动载 F_k。

⑥ 在伞衣口施加沿着半径向外的力 F_i。

该方法的优点是在于通过运用质点与弹簧的设置方式，可以较为真实地模拟伞绳及伞衣的柔性特质，通过 Adams 软件得出降落伞降落过程中弹簧的张力变化过程，从而可以较为全面地模拟降落伞伞绳及伞衣面的受力情况。该方法的缺点在于缺乏对实际外界环境的模拟，且由于 Adams 软件不能模拟弹簧的弯曲特性，因而质点之间利用单弹簧进行连接实际上是假设降落伞伞绳只存在线性伸缩，而不进行弯曲变形。

（3）多级弹簧联动法

通过对以上两种仿真分析方法进行融合与改进，对降落伞伞绳模型的建立及稳态降落过程中外部因素干扰的模拟方法进行了探讨，提出了一种多弹簧联动的仿真研究思路，具体方法如下：

① 将降落伞伞衣视为质量均匀分布的半球形刚体，在伞衣底边圆周上均匀分布 12 个连接点。

② 各连接点通过 1 根伞绳与降落伞承载物连接，连接处均为球面约束关系，每根伞绳为多节弹簧串联组成（图 5.5）。



图 5.5　多级弹簧联动仿真建模图

③ 同变空气阻尼分布设置法一样，将空气阻尼力载荷分为三个部分进行模拟，一是作用于主伞的减速阻尼力，二是始终作用于弹体的空气阻尼力载

荷，三是在降落过程中因风速等因素产生的空气阻尼力载荷。

联动特性则借助 Adams/View 中的运行阶段函数功能来实现；再利用 Adams 函数功能模拟真实环境中风力因素、上升气流、相对空气阻力因素的影响，深入细致地模拟环境变量对降落伞降落过程造成的影响。

该方法的优点在于采用了质点与弹簧建模法的基本思路，并根据具体情况将单弹簧升级为多级弹簧串联方式，使伞绳及伞衣更趋近于柔性体，从而使仿真效果更接近真实情况。使用多级弹簧串联方式，可细化降落伞局部受力情况，在此基础上结合多点阻尼参数设置以及建立降落伞降落过程中复杂的环境变量，可逼近真实情况下降落伞所受外部环境的干扰条件，从而使仿真结果更具可信度和有效性。

3. 降落伞系统搭建及仿真

为了通过仿真分析验证上述设计的正确性，通过三种基于 Adams 的降落伞仿真分析方法，按照下述降落伞设计参数建立虚拟模型，希望通过构建系统仿真分析平台得出相关仿真结果。

根据降落伞设计要求及设计参数的具体情况，并对降落伞实物的实验环境进行勘察后，设定降落伞参数如下：

① 抛投物为圆柱筒，质量 15 kg，抛投高度为 55 m。

② 外部恒定风力为 2 级，风速为 3 m/s 或外部恒定风力为 4 级，风速为 6 m/s，方向为西北 30°。

③ 重力加速度 $g=9.8\ \mathrm{m/s^2}$，空气密度 $\rho=1.25\ \mathrm{kg/m^3}$。

④ 整个伞衣是由弹性模量一定的织物构成的整体，没有加强带，仅存在一个整体性的伞衣幅。

⑤ 在 Adams 中设定接触地面的刚度为 $k=1.0\times1\,000\ \mathrm{N/m}$，力指数为 2.2，阻尼为 1 000，穿透深度为 1。

⑥ 预设降落伞开伞时间为 2 s，即抛投出去后，降落伞自由落体时间为 2 s。

⑦ 上升气流估算值为 2 m/s。

（1）变空气阻尼分布设置法的仿真分析

根据降落伞设计参数搭建系统模型，按照变空气阻尼分布设置法理论，将降落伞伞衣与伞绳设置为刚体，且为刚性连接，抛投物与降落伞之间的连接为球面连接，该约束限制了两物体之间的 3 个位移自由度，但仍有 3 个旋转自由度存在，即降落伞与弹体之间可以在任意方向旋转。

空气阻力分为三部分，一是伞衣球面空气阻力，该阻力集中于伞衣球面顶部；二是抛投物空气阻力，该阻力集中于抛投物底部圆心处；三是风速影响带来的空气阻力，该阻力可等分为 3 组，分别作用于伞衣侧球面、伞绳及抛投物侧面，空气阻力均通过空气阻力函数表示，其他条件遵循降落伞设计参数。

变空气阻尼分布设置法仿真结果可见表 5.1，采用该方法进行仿真分析的降落伞仿

真模型如图 5.6 所示。

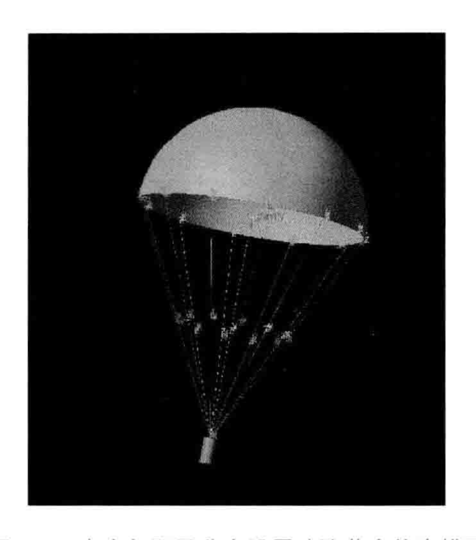


图 5.6　变空气阻尼分布设置法降落伞仿真模型

表 5.1　变空气阻尼分布设置法仿真结果一览表

伞衣直径/m	抛投质量/kg	风力条件/（m·s^{-1}）	降落高度/m	降落时间/s	稳定速度/（m·s^{-1}）	到达稳速时间/s	横向位移/m	纵向位移/m
3.4	15	3（西北）	55	8.031	5.568	3.2	7.667	9.976
3.4	15	6（西北）	55	8.425	5.572	3.5	20.913	25.275
1.3	3	3（西北）	55	5.805	8.705	4.2	3.101	3.512

（2）质点与弹簧法的仿真分析

根据降落伞的具体设计参数搭建系统模型，按照质点与弹簧法理论设置伞绳弹簧的有效弹簧刚度常数为 $k=1.0\times1\ 000$ N/m，设置伞衣球面空气阻力集中于伞衣球面顶部，空气阻力 F_k 通过空气阻力函数表示，同时，在伞衣侧球面、伞绳上及抛投物侧面施加风速影响带来的空气阻力，其他条件遵循降落伞设计参数。

质点与弹簧法仿真结果可见表 5.2，采用该方法进行仿真分析的降落伞仿真模型如图 5.7 所示。

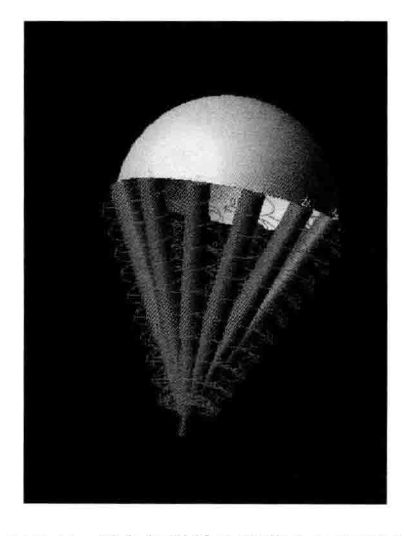


图 5.7　质点与弹簧法降落伞仿真模型

表 5.2 质点与弹簧法仿真结果一览表

伞衣直径/m	抛投质量/kg	风力条件/（m·s⁻¹）	降落高度/m	降落时间/s	稳定速度/（m·s⁻¹）	到达稳速时间/s	横向位移/m	纵向位移/m
3.4	15	3（西北）	55	8.531	5.568	3.2	7.667	9.976
3.4	15	6（西北）	55	8.833	5.251	4.0	21.002	27.721
1.3	3	3（西北）	55	5.882	8.433	4.4	3.212	4.441

（3）多级弹簧联动法的仿真分析

根据降落伞设计参数搭建系统模型，设置各伞绳由 4 根弹簧串联而成，各弹簧刚度均为 $k=1.0\times 10$ N/m，两弹簧之间由小型连接件连接，且为球面约束关系。伞绳与伞衣球面、伞绳与抛投物之间也均为球面约束关系。空气阻力分为三部分，一是伞衣球面空气阻力，该阻力集中于伞衣球面顶部；二是抛投物空气阻力，该阻力集中于抛投物底部圆心处；三是风速影响带来的空气阻力，该阻力可等分为三组，分别作用于伞衣侧球面、伞绳及抛投物侧面，空气阻力均通过空气阻力函数表示。

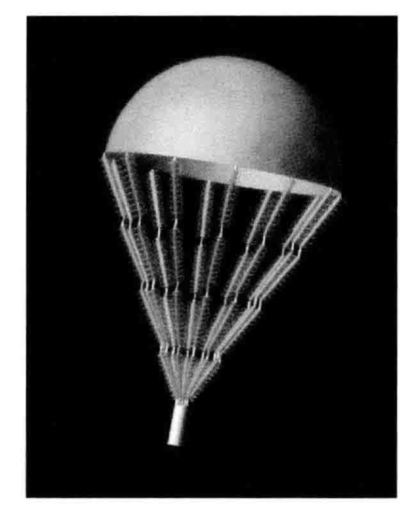


图 5.8 多级弹簧联动法降落伞仿真模型

多级弹簧联动法的仿真结果可见表 5.3，采用该方法进行仿真分析的降落伞仿真模型如图 5.8 所示。

表 5.3 多级弹簧联动法仿真结果

伞衣直径/m	抛投质量/kg	风力条件/（m·s⁻¹）	降落高度/m	降落时间/s	稳定速度/（m·s⁻¹）	到达稳速时间/s	横向位移/m	纵向位移/m
3.4	15	3（西北）	55	8.506	5.33	3.6	5.213	7.231
3.4	15	6（西北）	55	8.662	5.442	3.5	15.721	18.211
1.3	3	3（西北）	55	5.981	8.62	4.55	2.950	3.331

4. 仿真分析相关变量曲线图

根据上述三种仿真方法，降落伞在整个着陆过程中的速度、加速度、位移及水平偏移量曲线分别如图 5.9～图 5.11 所示。

在图 5.9 中，红色实线表示降落伞下落位移的变化情况，蓝色虚线表示降落伞速度的变化情况。降落伞抛投出后的第一阶段为自由落体阶段，保持自由落体运动，加速度恒定，因此降落伞下降速度均匀增大，位移曲率也逐渐增大。在降落 2 s 左右时，降落伞进入充气阶段，降落伞逐渐展开，其下降速度迅速减小，经过约 1 s 的时间，降落速

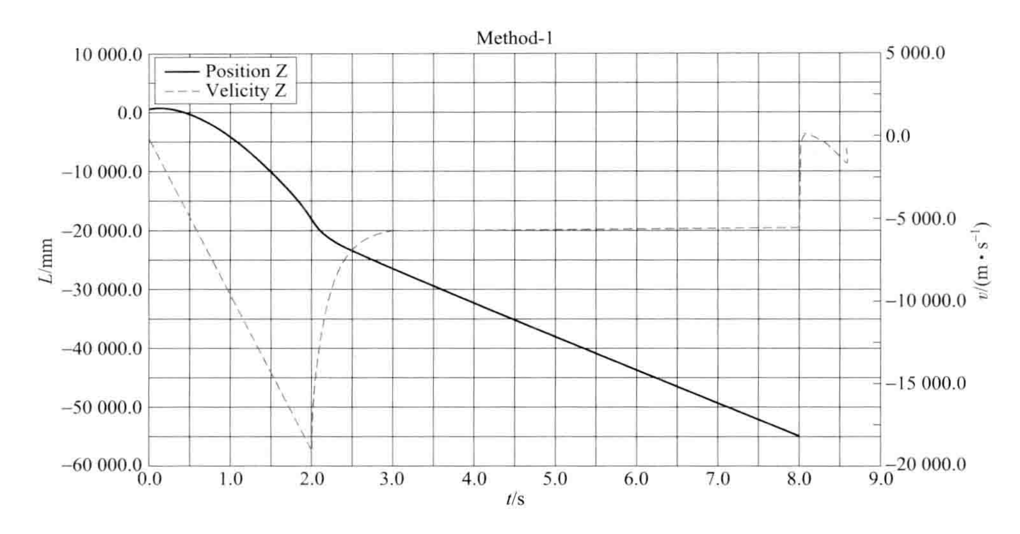


图 5.9　降落伞下落速度与位移图

度趋于恒定值，下落位移保持匀速变化。

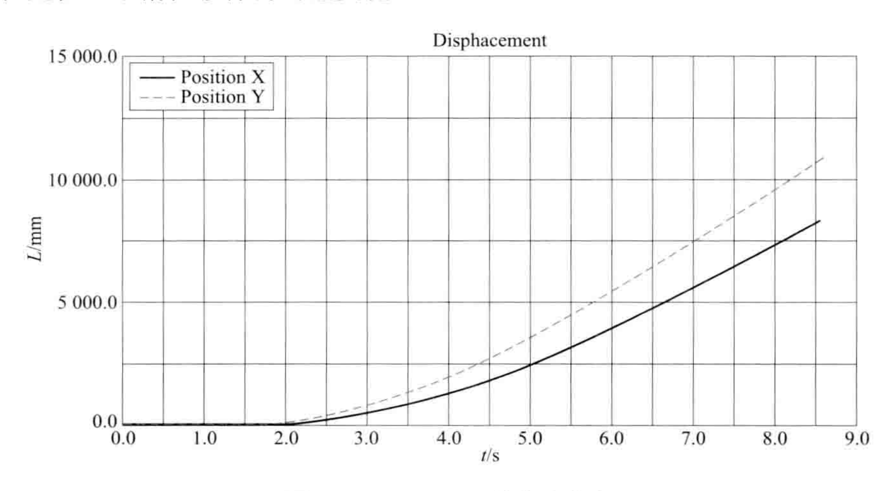


图 5.10　水平 *X/Y* 轴偏移曲线

图 5.10 所示为降落伞水平位移曲线，两条曲线分别代表水平偏移的纵向和横向。设风力保持不变，在抛撒后 2 s 以内，由于降落伞未展开，智能作战机器人的偏移量几乎为 0。当 2 s 以后，降落伞逐渐展开，侧向风力对降落伞产生的空气阻力使智能作战机器人水平偏移量逐渐增大。

图 5.11 所示为智能作战机器人降落过程加速度曲线，在降落初期 2 s 以内，降落伞未打开，智能作战机器人处于自由落体阶段，降落加速度保持为重力加速度。降落 2 s 左右时，降落伞迅速展开，加速度瞬间转为一个较大的正值，使降落速度迅速降低，约 3 s 左右，降落加速度区趋于 0，智能作战机器人保持匀速降落。

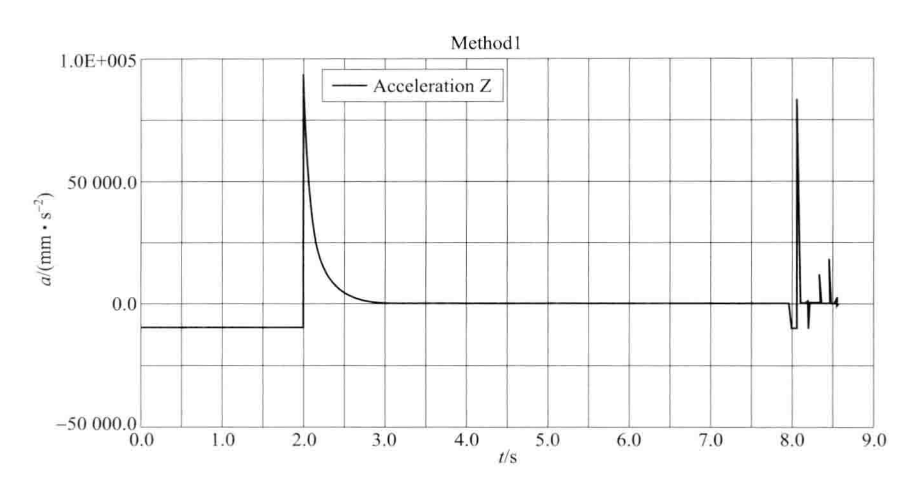


图 5.11 智能作战机器人降落过程加速度曲线

通过以上仿真数据可以初步确定该降落伞着陆稳定速度为 5～5.5 m/s，满足智能作战机器人对降落速度小于 10 m/s 的要求。

5.1.7 降落伞实物实验

根据智能作战机器人伞降减速系统的设计参数及仿真结构，按所提降落伞设计方案定制了一款降落伞（图 5.12，定名为Ⅰ型降落伞）。为了加强实验结果的可比性，开展合理的对比分析，另行购买了一款小型军用抛物伞（图 5.13，定名为Ⅱ型降落伞）。此外，在系统中也建立相关模型进行仿真，仿真参数除抛投物质量为 3 kg，其他参数与前述相同。

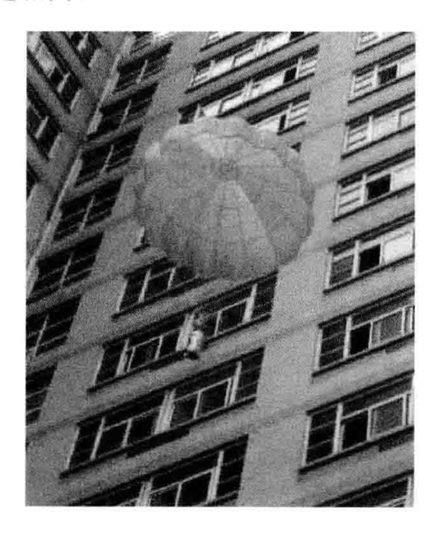


图 5.12 Ⅰ型降落伞（伞衣直径 3.4 m）



图 5.13 Ⅱ型降落伞（伞衣直径 1.3 m）

1. 降落伞实验过程及结论

根据已有的两款降落伞，对其进行了 3 次高空实物抛投实验，实验过程和结果如下：

（1）降落伞高空实物抛投实验一

为了了解智能作战机器人降落伞的降落特性，进行了高空实物抛投实验，第一次实验采用的是Ⅱ型降落伞，投放高度为 20 m，抛投物为各边长均为 350 mm 的方形纸箱体，降落伞伞绳数量为 36 根，抛投物质量可随纸箱添加物的质量而变，依次为 0 kg、3 kg、5 kg、10 kg，每组进行 3 次抛投试验，具体实验数据见表 5.4。通过实验得知，在无引导伞时，降落伞主伞开伞时间仍然很短，一般不超过 2 s。当选用空箱即纸箱载重量为 0 kg 时，降落伞无法正常进行充气和展开动作，降落过程杂乱无序。当载重量依次为 3 kg 和 5 kg 时，降落伞能按正常工作步骤进行充气、展开。但当载重量为 10 kg 时，由于过载严重，降落伞展开后无法保持正常展开外形，降落伞急速坠地，减速作用不明显。

表 5.4　降落伞高空实物抛投实验一

实验地点：重点实验楼 5 层，测试时间：2009 年 11 月 14 日　20:00—22:00							
测试次数	测试参数				测量结果		
	载重量/kg	降落高度/m	抛撒形式	伞绳数量	展开时间/s	总时间/s	相关说明
1	0	20	平抛	36	1.25	2.70	由于载荷过轻，降落伞充气、拉伸过程不正常
2	3	20	平抛	36	0.70	2.60	降落伞工作正常，缓冲作用较明显，基本无摆动
3	3	20	平抛	36	1.00	2.56	着陆速度较快，基本同上
4	3	20	平抛	36	1.20	2.50	抛投动作稍有变化，展开不顺利
5	5	20	平抛	36	0.95	2.21	降落速度明显加快，展开也加快
6	5	20	平抛	36	0.70	2.00	基本同上
7	5	20	平抛	36	0.92	2.39	基本同上
8	10	20	平抛	36	0.68	2.14	降落伞缓冲作用不明显，其他同上
9	3	20	平抛	24	1.10	2.50	与 36 根伞绳情况基本相同
10	3	20	平抛	18	1.21	2.60	摆动仍然极不明显
11	3	20	平抛	12	1.20	2.57	摆动有细微增大，降落伞伞衣充气后形状稍有不规则
注：承载物是一个边长均为 350 mm 的方形纸箱体，测试对象为Ⅱ型降落伞，伞衣直径 1.3 m。							

根据以上实验结果，将伞绳的数量进行了调整，将载重量为 3 kg 时的伞绳数量分别取为 24 根、18 根、12 根，然后进行实验，所得实验数据见表 5.5。实验结果证明，伞绳数量在降落伞正常工作中对保证伞衣展开形状有一定的作用，但作用不是十分明显，且伞绳数量的多少对降落伞降落过程中的摆动现象影响不大。

表 5.5 降落伞高空实物抛投实验二

实验地点：新二号楼 17 层，测试时间：2009 年 12 月 15 日 14:00—16:00								
测试次数	测试参数				测量结果			
	载重量/kg	降落高度/m	抛撒形式	伞绳数量	展开时间/s	最后 20 m 时间/s	总时间/s	相关说明
1	3（方盒）	58	平抛	18	1.7	1.47	5.52	在有风作用下，摆动仍然不明显
2	3（方盒）	58	平抛	18	1.78	1.52	5.56	基本同上，着陆速度快，超过 10 m/s
3	3（方盒）	58	平抛	18	1.92	1.51	5.55	基本直线降落，无摆动
4	3（弹筒）	58	平抛	18	1.53	1.42	5.92	与箱体情况类似，筒状似乎影响不大
5	3（弹筒）	58	平抛	18	1.83	1.35	5.55	抛投动作影响初始摆动
6	3（弹筒）	58	平抛	18	1.8	1.41	5.55	—
7	3（弹筒）	58	平抛	18	1.6	1.33	5.22	将降落伞通气孔半封闭，摆动明显，减速作用不明显
8	3（弹筒）	58	平抛	18	1.78	1.4	5.1	基本同上
注：承载物为直径 200 mm、高 400 mm 的弹筒与边长为 350 mm 方盒，测试对象为Ⅱ型降落伞，伞衣直径 1.3 m，环境风速约为 3 m/s。								

（2）降落伞高空实物抛投实验二

由于“降落伞高空实物抛投实验一”的抛投高度不够，无法对降落伞降落过程的第三阶段即稳定阶段进行有效分析，因此，降落伞高空实物抛投实验二将增加抛投高度。据测算，实验区水平风速约为 3 m/s，且实验区附近存在一定的上升气流。“降落伞高空实物抛投实验二”仍是以Ⅱ型降落伞为抛投实验对象，通过摄像机、照相机及测速仪器记录相关数据，具体实验数据见表 5.5。

从实验数据可初步得出以下结论：对作为伞降减速系统主要组成部分的小型抛物伞而言，其降落伞承载物分别为直径 200 mm、高 400 mm 的弹筒与边长为 350 mm 的方

盒，这些承载物在降落过程中的摆动幅度不大。由于Ⅱ型降落伞伞衣的直径仅为 1.3 m，无法使载重量为 5 kg 的弹筒稳定降落速度小于 7 m/s。5 kg 载重量时降落伞的稳定下降速度约为 9.2 m/s，与理论公式所得结果较为接近。

（3）降落伞高空实物抛投实验三

结合“降落伞高空实物抛投实验一”与“降落伞高空实物抛投实验二”的有利做法和有效经验，“降落伞高空实物抛投实验三”选用Ⅰ型降落伞进行实物抛投实验，实验环境同实验二，抛投物则选用质量分别为 5 kg、10 kg、15 kg 的圆柱形弹筒，具体实验数据见表 5.6。

表 5.6　降落伞高空实物抛投实验三

实验地点：新二号楼 17 层，测试时间：2009 年 12 月 26 日　14:00—16:00								
测试次数	测试参数				测量结果			
	载重量/kg	降落高度/m	抛撒形式	伞绳数量	展开时间/s	最后 20 m 时间/s	总时间/s	相关说明
1	5	58	平抛	16	3.48	未测得	9.66	抛投有失误
2	5	58	平抛	16	3.56～2.76	9.06～8.40	15.14～14.93	偏移较多
3	5	58	平抛	16	3.30～2.55	11.20～10.80	16.30～15.91	降落过程与墙体摩擦
4	10	58	平抛	16	2.78	7.28	12.19	绳子与障碍摩擦
5	10	58	平抛	16	2.57	6.21	10.03	降落伞未落地，挂墙上
6	10	58	平抛	16	3.04～2.80	6.67～5.10	10.05～10.18	较正常
7	15	58	平抛	16	2.57	7.2	10.90～10.75	较正常
8	15	58	平抛	16	2.55～2.62	5.13～5.18	8.91～8.85	此次抛投最符合降落伞正常降落过程，降落速度满足要求
9	15	58	平抛	16	3.39～2.7	4.71～4.09	8.50～8.85	较正常
注：经过标准测量，弹筒质量为 0.7 kg；前三次测试质量：5.14 kg；中三次测试实际质量：10.5 kg，后三次测试质量：15.88 kg。								

从实验数据可知，按照设计要求制作的Ⅰ型降落伞在降落过程中的特性表现与软件仿真结果类似，当载重量约为 15 kg 时，降落稳定速度控制在 5～6 m/s，满足智能作战机器人在缓冲、解脱、展开、扶正等功能上的使用要求。

2. 降落伞仿真及实验数据对比分析

通过三次降落伞高空实物抛投实验，得到一系列实验数据。在此基础上，通过对这三次实物抛投实验的结果与前述三种降落伞仿真方法的数据结果进行对比，所得对比结果分别见表 5.7～表 5.9。

表 5.7 实际实验结果和仿真分析结果对比一览表

项 目	风力条件 /（m·s^{-1}）	降落高度 /m	降落时间 /s	稳定速度 /（m·s^{-1}）	到达稳速时间/s	横向位移 /m	纵向位移 /m
实际试验参数	3（西北）	58	8.89	5.4	—	5.4	7.1
变空气阻尼分布设置法	3（西北）	55	8.031	5.568	3.2	7.667	9.976
质点与弹簧法	3（西北）	55	8.388	5.310	3.5	9.021	12.312
多级弹簧联动法	3（西北）	55	8.506	5.33	3.6	5.213	7.231
注：伞衣直径为 3.4 m，抛投质量为 15 kg。							

表 5.8 实际实验结果和仿真分析结果对比一览表

项 目	风力条件 /（m·s^{-1}）	降落高度 /m	降落时间 /s	稳定速度 /（m·s^{-1}）	到达稳速时间/s	横向位移 /m	纵向位移 /m
实际试验参数	3（西北）	55	5.54	12.5	—	2.8	3.2
变空气阻尼分布设置法	3（西北）	55	5.805	8.705	4.2	3.101	3.512
质点与弹簧法	3（西北）	55	5.882	8.433	4.4	3.212	4.441
多级弹簧联动法	3（西北）	55	5.981	8.62	4.55	2.950	3.331
注：伞衣直径为 1.3 m，抛投质量为 3 kg。							

表 5.9 实际实验结果和仿真分析结果偏差率一览表

	伞衣直径 /m	抛投物质量/kg	着陆时间偏差率/%	稳定速度偏差率/%	横向位移偏差率/%	纵向位移偏差率/%
变空气阻尼分布设置法	3.4	15	9.663	−3.111	−41.981	−40.507
质点与弹簧法	3.4	15	5.647	1.667	−67.056	−73.408
多级弹簧联动法	3.4	15	4.319	1.296	3.130	−1.845
变空气阻尼分布设置法	1.3	3	−4.783	26.849	−14.852	−9.750
质点与弹簧法	1.3	3	−6.173	29.134	−18.963	−38.781
多级弹簧联动法	1.3	3	−7.960	27.563	−9.259	−4.094

从三次实际伞降实验结果与三种方法仿真结果的对比可以看出，根据降落伞理论设计的智能作战机器人降落伞在仿真中所得结果与实物实验基本相同，有力证明了该降落伞理论设计的合理性与可行性。

5.2　火箭助推系统的设计与研究

智能作战机器人在遂行作战任务时，当探测子系统通过搜索目标、采集信息、分析处理等一系列工作，确定了敌洞库类目标后，经控制子系统调整瞄准诸元，随即给推进子系统发出点火指令，助推火箭则驱动弹丸向敌洞库类目标飞去，发起攻击。对于助推火箭来说，其助推力的大小、飞行距离的长短，以及飞行姿态的稳定与否都极为重要，它直接关系着智能作战机器人作战使命能否顺利完成，因此，应对火箭助推系统的研究应给予极大的关注。

5.2.1　小型助推火箭简介

根据智能作战机器人的功能特性和结构特点，在对其助推火箭进行研究和设计时，可参考国内外现有同类产品的成功案例，以缩短设计时间、节省设计成本。

1. 阿皮拉反坦克火箭弹

法国“阿皮拉”反坦克火箭弹是一款享有盛誉的反坦克单兵武器（图 5.14），其发射筒和发动机壳体分别用玻纤增强环氧树脂和芳纶纤维增强环氧树脂制造。“阿皮拉”反坦克火箭弹的火箭发动机性能十分出色，具体性能指标见表 5.10。




图 5.14　法国“阿皮拉”反坦克火箭弹

表 5.10　“阿皮拉”反坦克火箭弹火箭发动机性能指标一览表

内弹道及性能参数		结构及质量参数		药型及装填参数	
推力冲量	1.165 kN·s	发动机外径	<111.8 mm	装药根数	142
比冲	大约 210 s	喷管喉径	72 mm	药条厚度	0.6 mm

续表

内弹道及性能参数		结构及质量参数		药型及装填参数	
最大压力	43.3 MPa（+50 ℃）	发动机质量	1.85 kg	药条长度	160 mm
燃烧时间	5 ms（+51 ℃） 6.5 ms（+21 ℃） 8.5 ms（−31 ℃）	装药质量	0.6 kg	—	—
—	—	点火药质量	51 g	—	—

2. 丘比特 ACL300 式 70 mm 火箭筒

根据法国陆军提出的对新的近程和超近程反坦克武器的要求，法国吕歇尔公司于1979 年和法国国防部签订研制合同。经过两年的努力，成功地研制出射程为 330 m 的反坦克武器系统，命名为丘比特 ACL300 式反坦克武器，并于 1981 年和 1983 年在法国第八届萨托里陆军武器装备展览会上展出。其后，由于该武器质量偏大，决定由法国欧罗派克公司、吕歇尔公司和德国 MBB 有限公司合作进行改进和提高。丘比特 ACL300 式 70 mm 火箭筒（图 5.15）利用平衡抛射原理与火箭增程技术相结合的方式，发射 115 mm 超口径破甲弹，能在 2.5 m×2.5 m×2.5 m 的室内发射，而且它使用简便，士兵左、右手均能操纵与射击。



图 5.15 丘比特 ACL300 式 70 mm 火箭筒

丘比特 ACL300 式 70 mm 火箭筒配备有火箭增程破甲弹，该弹主要器件有：炸高控制触杆、引信头部、风帽、弹体、药型罩、炸药、传爆装置、火箭发动机和尾翼等。该火箭筒采用戴维斯发射原理和平衡抛射结构，由发射筒（含筒身、药室、前后活塞、前后挡环、前后挡盖）、击发机、肩托、手柄等组成。筒体采用钢制材料，前端直径较粗，以容纳超口径火箭增程弹，筒后部装有配重平衡体。发射筒一次性使用，但发射装置和肩托等发射后并不抛弃，可以再用。发射前，射手打开发射筒前盖，弹头触杆自动解脱伸出筒口，瞄准目标后扣压扳机，启动感应线圈点燃发射药。发射药燃烧后产生强大的燃气压力作用于活塞，前活塞抛出火箭增程弹，后活塞推出塑料片平衡体，散落在地面上，同时，2 个活塞被制动环挡住，封闭发射筒，阻止火药燃气、火焰、烟雾和冲击波外逸，并使噪声降到 135 dB 以下。

该火箭筒配有塑料壳光学瞄准镜和 M309 式光学瞄准镜，放大率均为 3 倍。前者射击后可以随发射筒一起抛弃；后者射击后必须与发射装置一起回收，以供重复使用。此外，该火箭筒还配有夜战用 OB25 式夜视仪。该火箭筒配用火箭增程破甲弹，破甲弹由空心装药战斗部（含压电引信）、火箭发动机和尾翼组件等组成。弹体用铝合金制造，

前端有装于滑架内的触杆，射击时能自动伸出 100 mm，以控制炸高。4 片斜置尾翼在射弹离开筒口后自动张开，使弹体绕纵轴微旋，以获得良好的命中概率。增程火箭发动机在射弹飞离筒口 4～10 m 的距离内点火，使弹速由 180 m/s 增至 275 m/s。丘比特 ACL300 式 70 mm 火箭筒具体性能数据如下：

① 口径——70 mm。

② 火箭筒携行状态长——1 100 mm。

③ 火箭筒战斗状态长——200 mm。

④ 火箭筒战斗总质量——12 kg。

⑤ 火箭筒质量——7.6 kg。

⑥ 配用弹种——破甲弹。

⑦ 弹径——115 mm。

⑧ 弹长——650 mm。

⑨ 弹质量——3.4 kg。

⑩ 战斗部质量——1.3 kg。

⑪ 火箭发动机质量——1.9 kg。

⑫ 初速——180 m/s。

⑬ 最大速度——275 m/s。

⑭ 有效射程——330 m。

⑮ 弹丸飞行时间（330 m）——1.2 s。

⑯ 破甲厚度≥800 mm。

⑰ 瞄准装置——塑料壳光学瞄准镜，M309 式光学瞄准镜，OB25 式夜视仪。

3. 布朗特 130 mm 火箭筒

法国汤姆逊-布朗特军械公司在法国第八届陆军武器装备展览会期间，展出了 AC300 式和 AC 式 2 种步兵反坦克武器。此后，又在原来的技术基础上，并借鉴其他同类产品的成功经验，研制出了布朗特 130 mm 反坦克火箭筒（图 5.16），于 1983 年 6 月在法国第九届陆军武器装备展览会上展出，并于 1985 年 6 月进行了表演试验。



图 5.16　布朗特 130 mm 火箭筒

布朗特 130 mm 火箭筒结构简单、性能稳定、操作方便，可隐蔽射击，适于在狭小的空间内使用。

该火箭筒采用戴维斯原理，是火箭增程技术与敞开式平衡抛射方式相结合的典型产品之一，由发射筒、击发机构、平衡体、瞄准具、防护端盖、手柄、肩托等组成，可左右手使用。叠装发射筒用凯夫拉碳素纤维复合材料制成，

发射时可拉长 400 mm，用后丢弃。其击发机构和瞄准具可移用到下一发预装弹的发射筒上，供多次使用。发火机构简单、安全，和迫击炮相似，不受气候条件影响和电磁辐射干扰。平衡体为塑料碎片，从筒后抛出时，动能迅速被空气阻力抵消，散落于地面上。发射噪声低于 180 dB，允许在 3 m×3 m×2.5 m 的有限空间内使用。总质量仅 13 kg，较为轻便。

该火箭筒配用简易瞄准镜，放大率为 3 倍；也可配光电火控系统。作战时，火箭筒配用破甲火箭弹，其战斗部空心装药为黑索金和梯恩梯混合炸药，爆速 7 800 m/s，密度 1.65 g/cm^3，炸高为 1.5 倍口径。火箭发动机装有法国国营火炸药公司生产的 TT17 双基药，可在 0.4 s 内燃烧完毕，把弹速由 210 m/s 提高到 275 m/s。具体性能数据如下：

① 口径——30 mm。

② 火箭筒携行状态长——1 190 mm。

③ 火箭筒战斗状态长——1 580 mm。

④ 火箭筒战斗总质量——13 kg。

⑤ 配用弹种——破甲弹。

⑥ 弹质量——4.5 kg。

⑦ 战斗部质量——3.5 kg。

⑧ 初速——210 m/s。

⑨ 最大速度——275 m/s。

⑩ 有效射程：使用简易瞄准镜时——300 m；使用光电火控系统时——600 m。

⑪ 破甲厚度（复合靶板）>900 mm。

5.2.2 助推火箭的设计与分析

根据智能作战机器人整体性能要求，对推进子系统的功能特性和使用特点进行了详尽地理论分析和工程探索工作，并多次派人到相关企业进行调研，掌握智能作战机器人助推火箭的设计方法。在综合国内外同类产品或相近产品设计成果的基础上，决定采用固体火箭发动机作为机器人推进装置。

1. 火箭发动机内弹道计算

经过系统研究，确定选用 GLQ—1 单推力发动机设计方案。该发动机所用推进剂的密度 $\rho=1.668\ g/cm^3$，燃速 $r=25$ mm/s（采用高燃速的推进剂），再确定燃烧室的工作压力 $p=6.68$ MPa，发动机的比冲 $I_{sp}=2\ 279\ N\cdot s/kg$。此后，根据总冲估算装药质量 $W_p=KI/I_{sp}=1\times\frac{2\ 000}{2\ 279}kg=0.88\ kg$，此处 $K=1.0\sim1.05$，系数 K 是考虑到推进剂制造上可能造成的性能偏差和尺寸偏差。先定推力 $F=500$ N，又知智能作战机器人要求其助推火箭的直射射程为 $S=200$ m，总质量为 $m=10$ kg。经过仿真，以 500 N 的力

推 10 kg 物体 4 s 可以达到直射 200 m 的效果，其总冲为 $I=2\ 000\ \text{N}\cdot\text{s}$。

根据规定的推力和选定的设计点工作压力计算喷管喉部面积 A_t，有：

$$A_t=\frac{F}{c_f p} \tag{5.3}$$

式中，c_f 为推力系数，取值 1.4～1.5。经计算可知喷管截面的直径。

根据选定的工作压力，估算燃烧面积，有：

$$S=\frac{F}{\rho r I_{sp}} \tag{5.4}$$

估算所需装药肉厚 e，可有：

$$e=rt \tag{5.5}$$

根据燃烧面积确定采用端燃方式及燃面直径。

图 5.17 所示为该火箭发动机在推力为 500 N 时初射角与直射距离关系。

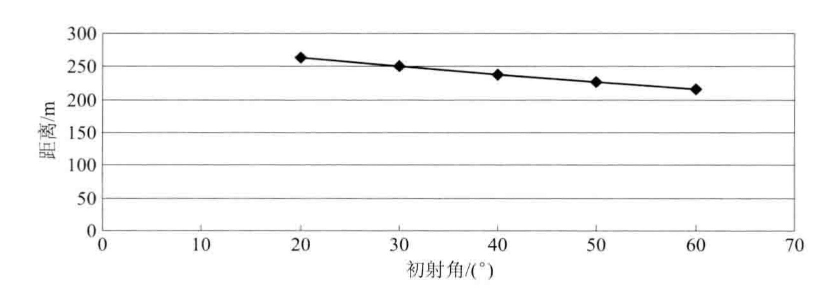


图 5.17　推力为 500 N 时初射角与直射距离关系（未考虑空气阻力）

2. 火箭发动机燃烧室壳体结构设计

燃烧室壳体结构采用钛合金筒体、椭球形封头、螺纹连接、平垫圈密封、前支撑件支撑（弹簧、弹性垫）。

3. 火箭发动机喷管结构设计

经与同类产品比较，借鉴其成功经验，确定智能作战机器人助推火箭采用单喷管结构。

4. 火箭发动机点火装置设计

鉴于所设计的火箭发动机是单药柱，且小型化的，在点火器方面选择了整体式点火器，将发火管设计为低电阻、高安全电流和高发火电流的电火管（出于安全考虑）。相关参数见表 5.11。

表 5.11　低电阻发火管参数一览表

总电阻/Ω	电源电压/V	功率/W	电流/A
<0.5	1～1.5	2～4.5	2～3

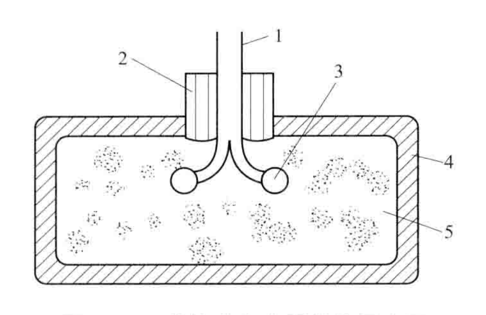


图 5.18 整体式点火器结构示意图

1—导线；2—绝缘套；3—电发火管；4—药盒；5—点火药

该整体式点火器的结构情况如下：

电发火管与点火药做成一体，放置在点火药盒内。优点是结构简单，点火滞后小。缺点是发火管损坏时整个点火器损坏，经济性差。为了提高可靠性，可采用如图 5.18 所示的双发火管配置。

点火药选用黑火药，它被广泛用作双基推进剂的点火药。

5. 点火药药量的估算

根据点火药药量经验公式计算

$$m=1.2\times10^{2}A_{b} \tag{5.6}$$

其中，A_b 为初始燃面面积（cm^2）。经计算可得黑火药的用量为 1.8 g。

需要说明的是，由于智能作战机器人助推火箭发动机采用一维端燃方式，点火器要置于发动机喷喉与药柱之间，如果药柱是浇注式的，则需要有点火器支撑装置。

5.2.3 助推火箭的研制与思考

考虑到智能作战机器人助推火箭在设计、研制、实验方面存在特殊性，与火箭发动机专业生产企业进行了合作研究，双方提出了一些具体方案，介绍如下：

1. 方案一

方案一的主要特点是火箭发动机（图 5.19）外径为 90 mm，长度为 180 mm，其结构形状和尺寸比较符合智能作战机器人有关火箭助推装置结构紧凑、体积小巧、重量轻盈的设计要求。但该发动机没有尾翼，飞行稳定性有所缺失，如果需要保证助推装置飞行的稳定性，可在弹体上加装折叠翼。



图 5.19 90 mm 外径火箭发动机

2. **方案二**

方案二的主要特点是火箭发动机（图 5.20）外径为 80 mm，长度为 200 mm。该发动机采用 7 根装药。



图 5.20　80 mm 外径火箭发动机

目前，已知控制火箭发动机飞行稳定性的方法为斜喷管和尾翼。斜喷管的作用是使弹体的飞行轨迹呈螺旋状，有助于增加弹体的稳定性，保证发射精度。尾翼的作用为平衡弹体各种受力，使弹体飞行平稳，增加弹体稳定性，保证发射精度。故这里还需要进行弹体的总体设计，考虑质心和压心的位置关系。

5.3　运动学、动力学仿真分析

在智能作战机器人研制过程中，对其进行运动学、动力学分析，得到有关零件的速度、加速度和所受载荷的时间历程，可为修正设计缺陷、优化设计方案提供依据。在此思路指导下，展开系统、深入、全面的运动学、动力学分析工作，取得了许多有价值的研究成果，为提高智能作战机器人的研制水平创造了条件。

5.3.1　着陆展开过程的运动学、动力学仿真分析

根据理论分析和实际计算的结果可知，当智能作战机器人经抛撒后，如能以 3～7 m/s 的稳定速度着陆，则机器人着陆时所受冲击力不会对弹上重要器件产生破坏性作用。于是相关的仿真便以 3～7 m/s 着陆速度为前提在 Adams 中进行，以探索相关的运动学、动力学规律。由于在 3～7 m/s 着陆速度区间内，7 m/s 着陆速度对应的地面冲击力最大，故仿真分析工作均以 7 m/s 着陆速度为例来进行。

1. **基座的运动学、动力学仿真分析**

由前述内容可知，智能作战机器人基座下面加装有橡胶垫作为缓冲装置，来减小和

缓和着陆时机器人所受到的冲击作用。将相关影响因素考虑在内，并作出适当设置，经过 Adams 仿真，可得基座在着陆触地过程中的位移、速度、加速度，分别如图 5.21、图 5.22 和图 5.23 所示。

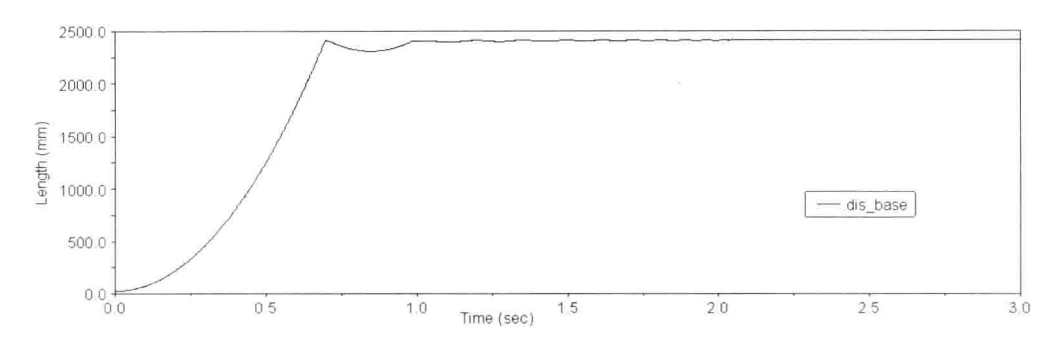


图 5.21　智能作战机器人基座位移曲线示意图

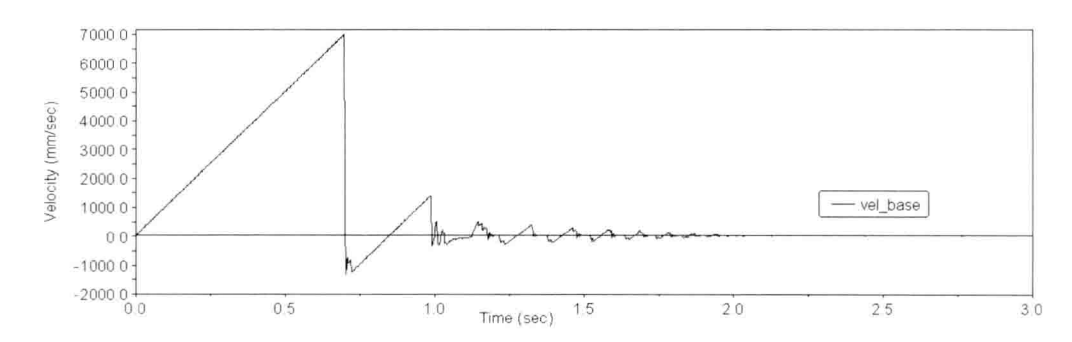


图 5.22　智能作战机器人基座速度曲线示意图

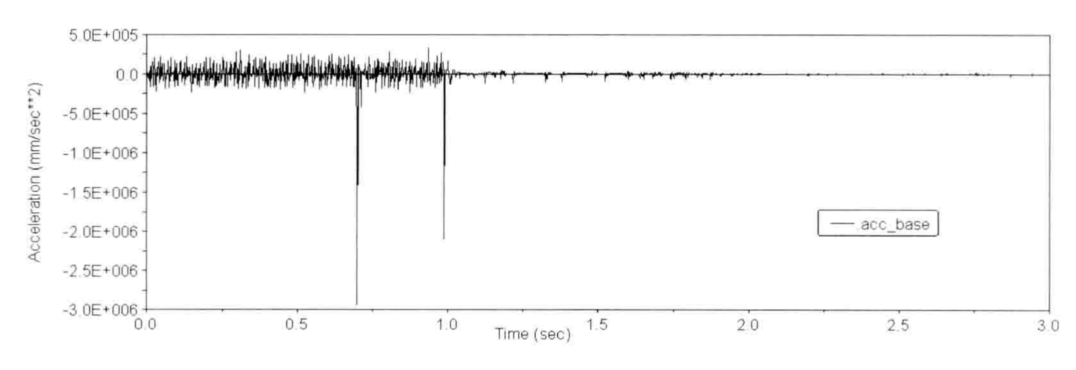


图 5.23　智能作战机器人基座加速度曲线示意图

从以上三图可以看出，智能作战机器人的基座大约在 0.7 s 时触地，此时其速度急剧下降，加速度达到 $2.943\,7\times10^{6}$ mm/s^2。另外，在第一次触地后，机器人会弹起，而后又落下，接下来逐渐趋于稳定。

2. **支撑板的运动学、动力学仿真分析**

在智能作战机器人着陆过程中，当支撑板挂钩从发射筒卡槽中释放出来后，在扭簧作用下，支撑板迅速展开，机器人得以扶正，并随即进入工作状态。为了更好地模拟机器人在着陆过程中支撑板的运动学、动力学特性，在虚拟样机建立中，对每个支撑板都设定了与地面的接触关系，所得支撑板受力和支撑板受力合成情况的仿真结果如图 5.24 和图 5.25 所示。

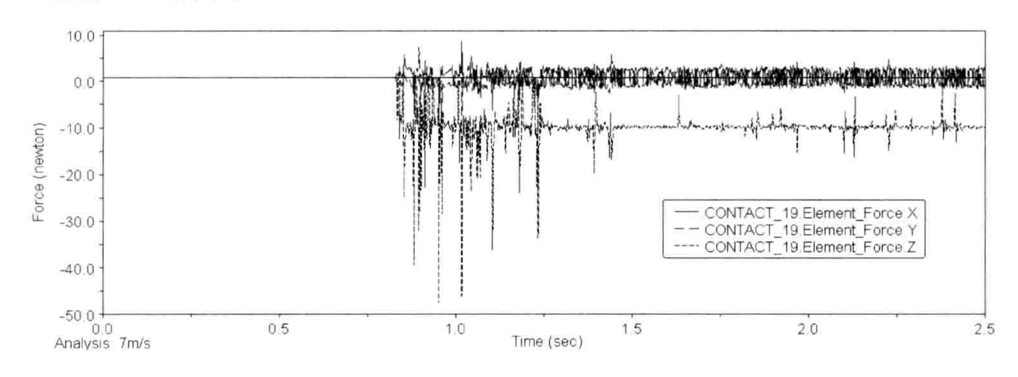


图 5.24　支撑板受力仿真结果示意图

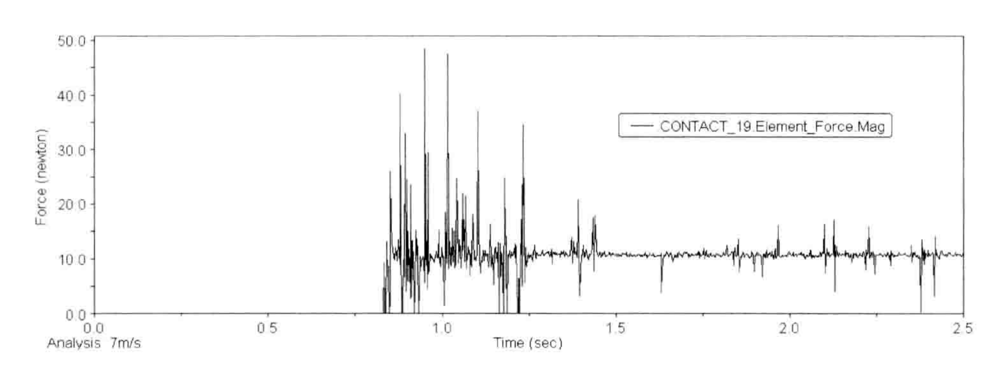


图 5.25　支撑板受力合成情况仿真结果示意图

由图 5.25 可知，合成力最大值为 50 N，利用此值可以进行智能作战机器人支撑板的强度校核和变形分析。

3. **压缩弹簧、扭簧的运动学、动力学仿真分析**

图 5.26 所示为智能作战机器人在以 7 m/s 的速度着陆时其基座承重压缩弹簧的受力情况，从图可以看出基座承重压缩弹簧最大受力达到 115 N。图 5.27 所示为智能作战机器人在以 7 m/s 的速度着陆时，其支撑板扭簧所受扭矩情况。通过对这些力和扭矩情况的掌握，可以为相关弹簧的设计提供参考数据。

4. **弹上零件所受冲击加速度**

在智能作战机器人着陆展开瞬间，弹上有关零件所受的冲击力较大，可能会对机器

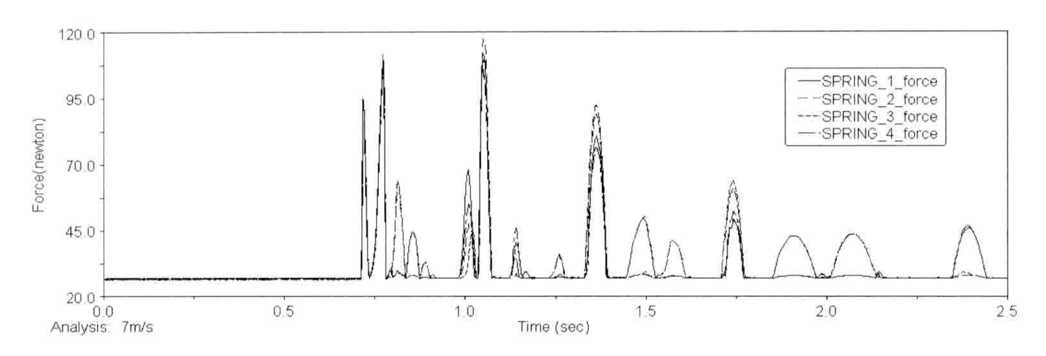


图 5.26 基座承重压缩弹簧的受力情况（着陆速度为 7 m/s 时）

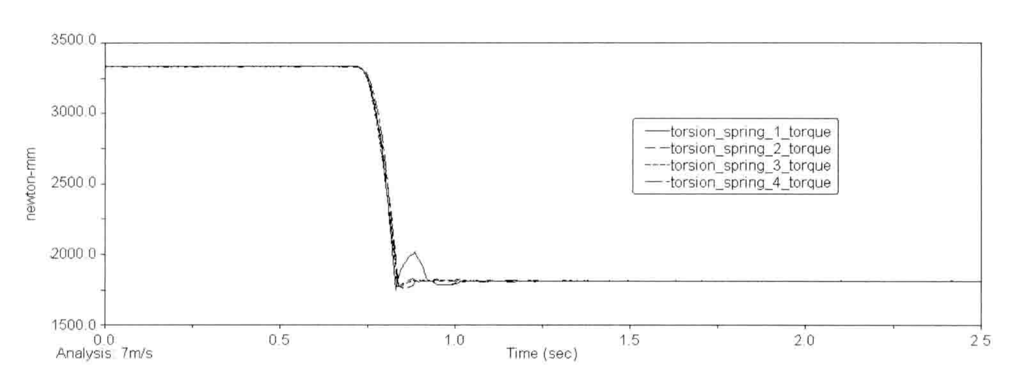


图 5.27 支撑板扭簧所受扭矩情况（着陆速度为 7 m/s 时）

人的探测器件、控制器件以及运动器件造成破坏，因而需要了解智能作战机器人的加速度情况，采用相应的加速度值来校核强度，判断是否存在冲击力过大的危险，同时判断是否需要改进缓冲装置，减小冲击。图 5.28 显示了机器人着陆瞬间所受加速度的情况。

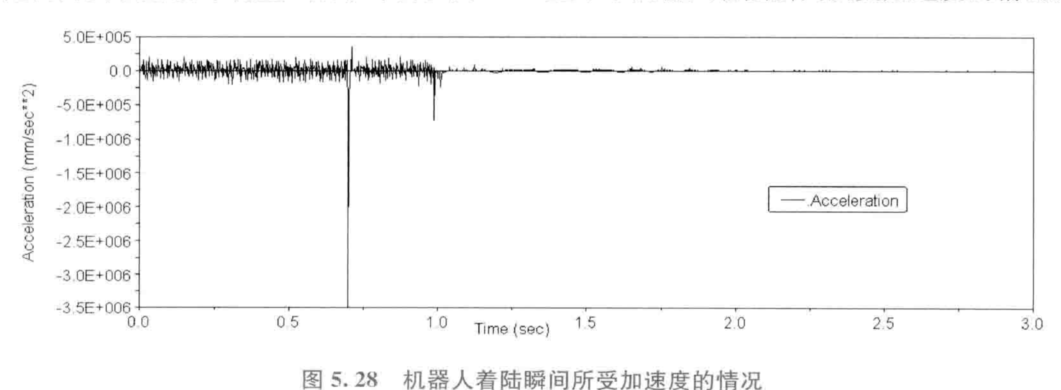


图 5.28 机器人着陆瞬间所受加速度的情况

5.3.2 搜索扫描过程的运动学、动力学分析

智能作战机器人着陆展开后，下一步便要进行目标的搜索，由步进电动机驱动 2 自

由度运动平台进行水平面内的周向转动和垂直面内的俯仰摆动，弹载视觉系统则分幅分层扫描周边景物，为目标分析和识别提供相关基础图像信息。

1. **运动规划**

智能作战机器人的运动云台具有两个运动自由度，即在水平面内的周向转动和垂直面内的俯仰摆动。在运动云台对周边景物的搜索扫描过程中，云台首先从起始位置（机器人发射筒中心轴与水平轴重合位置）开始俯仰运动，向上摆动 30°；然后运动云台开始绕机器人基座垂直轴水平周转，转动 360°；此后，运动云台又进行俯仰运动，向上摆动 20°，待俯仰运动完成后，又进行水平周转，转动 360°；最后，运动云台进行俯仰运动，向上摆动 20°，再进行水平周转，转动 360°。考虑到视觉器件扫描周围景物的速度和蜗杆副的传动比情况，俯仰摆动时间定为 4 s，水平周转时间为 6 s。在步进电动机驱动上拟采用正弦曲线速度驱动模式。

由前述内容可知，智能作战机器人运动云台水平周转机构的传动比为 $i=\frac{40}{9}$，故可得知，在该水平周转机构中，大齿轮每旋转 1 圈，小齿轮则需转动$\frac{40}{9}$圈，转过的角度为$\frac{40}{9}\times 360°=1\ 600°=\frac{80}{9}\pi$（rad）。若在 2 s 内小齿轮采用正弦曲线运动规律来转动这些角度，则有：

$$m\int_{0}^{6}\sin\frac{\pi}{6}t\mathrm{d}t=\frac{80}{9}\pi \tag{5.7}$$

经计算，可得 $m=\frac{20}{27}\pi^2$，换算成角度为$\frac{400\pi}{3}$。

在水平周转情况下，运动云台水平周转驱动电动机的工作曲线为$\frac{400\pi}{3}\sin\frac{\pi}{6}t$，Adams 中的速度驱动函数为：

```
if(time-4:0,0,if(time-10:PI * 400d * sin((time-4) * PI/6)/3,0,
if(time-14:0,0,if(time-20:PI * 400d * sin((time-14) * PI/6)/3,0,
if(time-24:0,0,if(time-30:PI * 400d * sin((time-24) * PI/6)/3,0,0))))))
```

同样，由前述内容可知，运动云台俯仰摆动机构的传动比为 $i=70$，且第一次俯仰运动 30°，第二次和第三次均为 20°，三次运动时间都为 4 s，对应步进电动机驱动转过的角度为 $2\ 100°=\frac{70}{6}\pi$，$1\ 400°=\frac{70}{9}\pi$。参照旋转运动计算方法，将上述角度转化成正弦曲线，则分别为$\frac{1\ 050\pi}{4}\sin\frac{\pi}{4}t$，$175\sin\frac{\pi}{4}t$，Adams 中的速度驱动函数为：

```
if(time-4:PI * 1 050d * sin(time * PI/4)/4,0,if(time-10:0,0,
if(time-14:PI * 175d * sin((time-10) * PI/4),0,if(time-20:0,0,
if(time-24:PI * 175d * sin((time-20) * PI/4),0,0)))))
```


水平周转和俯仰摆动的驱动控制情况分别如图 5.29 和图 5.30 所示。

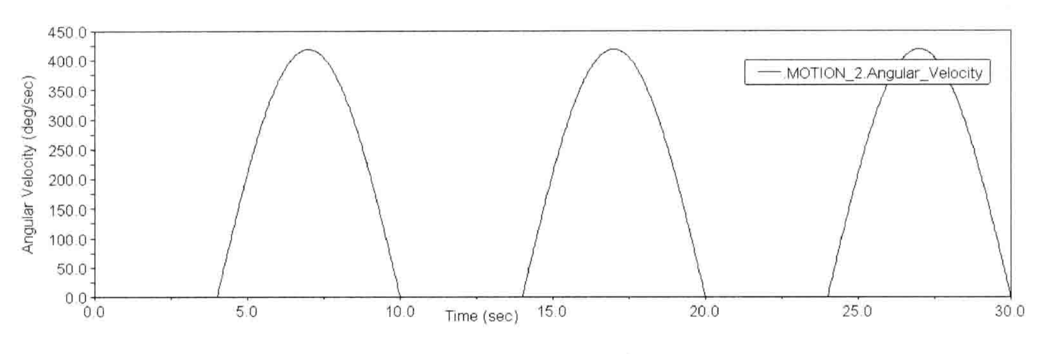


图 5.29 水平周转驱动控制情况示意图

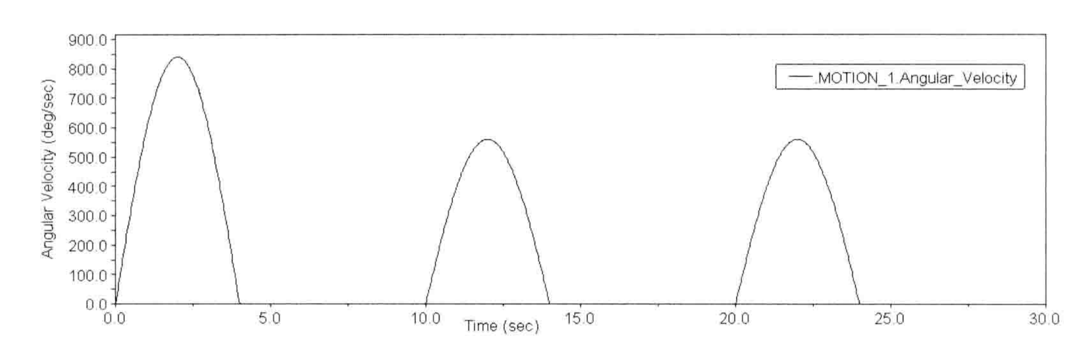


图 5.30 俯仰摆动的驱动控制情况示意图

2. **步进电动机驱动转矩**

将上述正弦驱动曲线施加到相应的旋转副上，在 Adams 中进行仿真，可得水平周转和俯仰摆动驱动步进电动机角加速度和转矩的仿真结果，分别如图 5.31～图 5.34 所示。

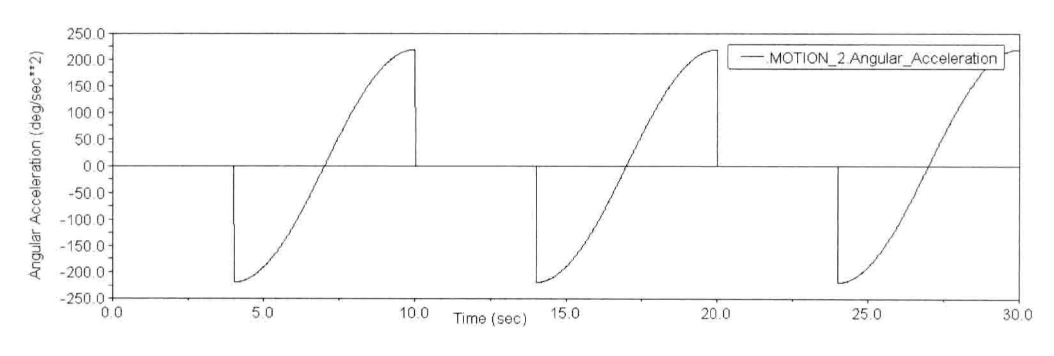


图 5.31 水平周转运动驱动步进电动机角加速度仿真结果

由图 5.32 可知，水平周转驱动步进电动机的最大转矩为 5 403.161 4 N·mm，最小转矩为 0.603 8 N·mm，均值为 524.270 6 N·mm。

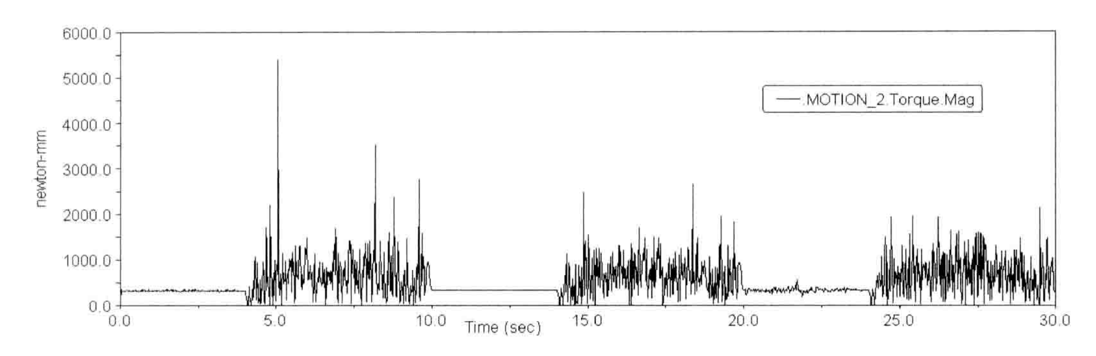


图 5.32　水平周转驱动步进电动机转矩仿真结果

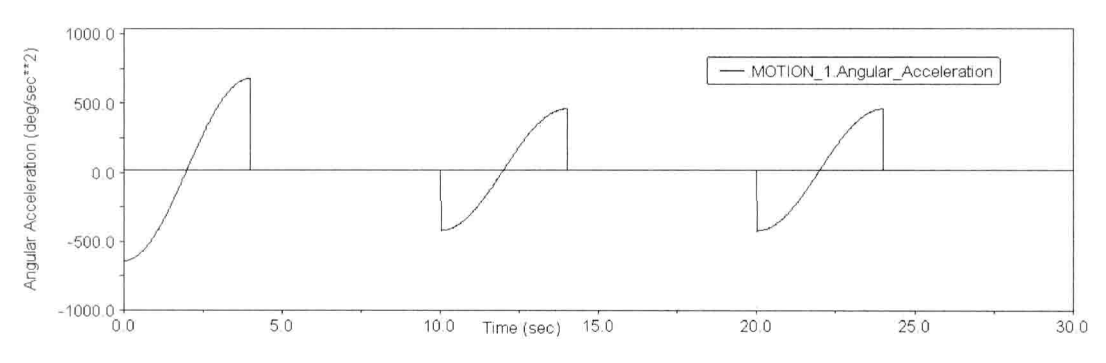


图 5.33　俯仰摆动驱动步进电动机角加速度仿真结果

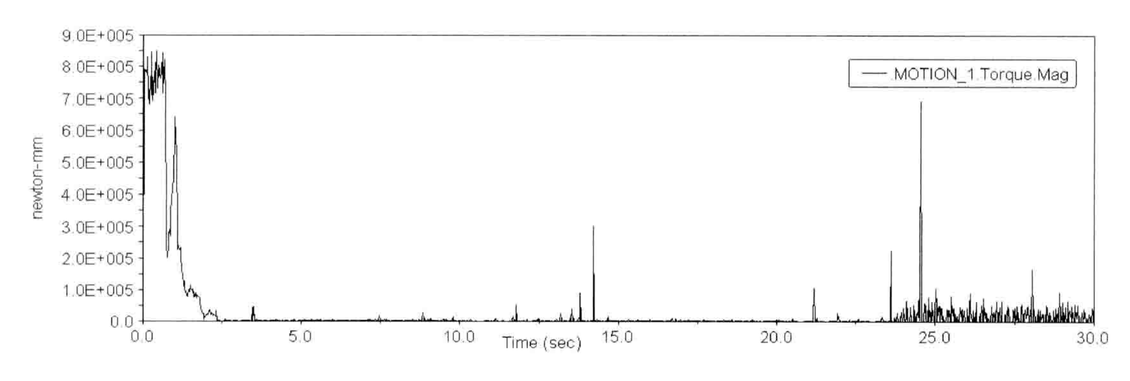


图 5.34　俯仰摆动驱动步进电动机转矩仿真结果

由图 5.34 可知，俯仰摆动驱动步进电动机的最大转矩为 $8.511\,1\times10^{5}$ N・mm，最小转矩为 $7.833\,4\times10^{-16}$ N・mm，均值为 32 535.295 8 N・mm。

3. 智能作战机器人传动机构的运动学、动力学分析

通过对有关数据的详尽分析，然后仔细选择仿真参数和妥善确定相关条件，在

Adams 中进行仿真，可得机器人发射筒末端位移、速度的变化曲线分别如图 5.35、图 5.36 和图 5.37 所示。

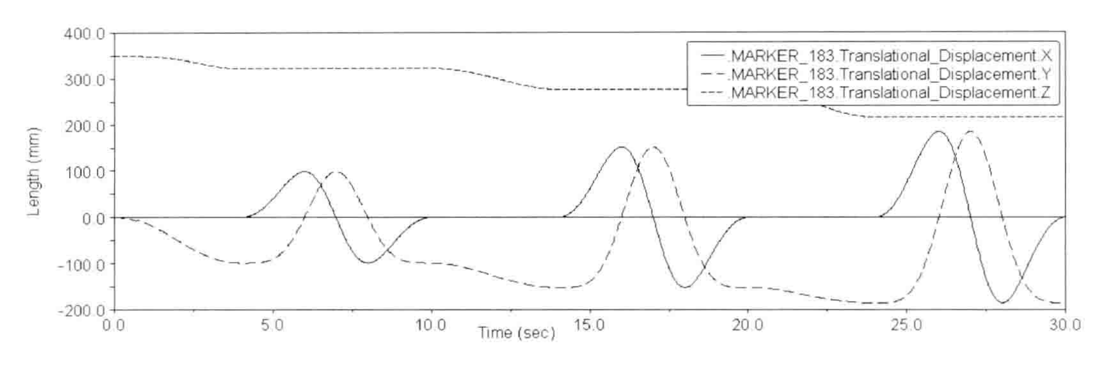


图 5.35　机器人发射筒末端位移变化曲线

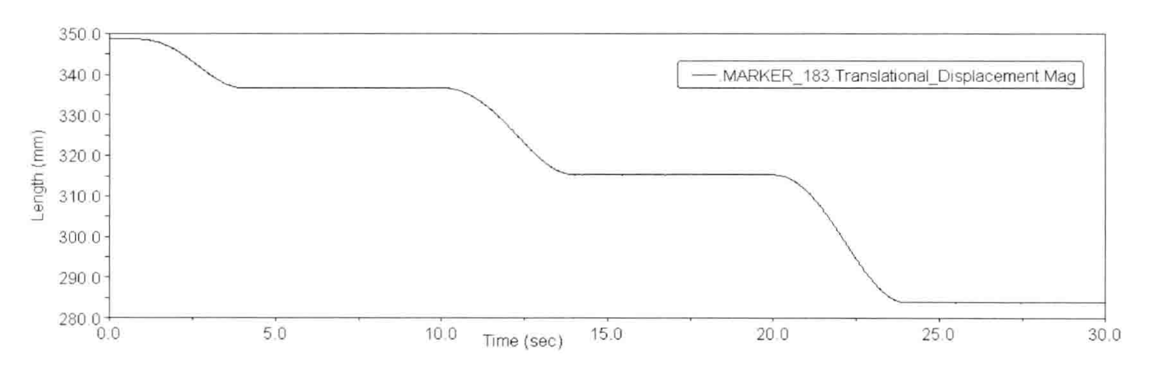


图 5.36　机器人发射筒末端位移合成曲线

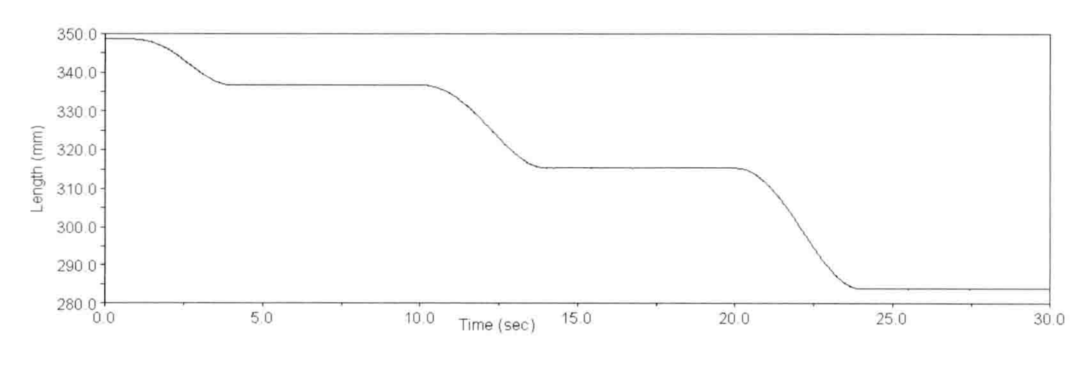


图 5.37　机器人发射筒末端速度变化曲线

给运动云台周转齿轮间添加接触后进行仿真，可得齿轮间的接触力如图 5.38 所示。

由图 5.38 可以看出，周转齿轮副间存在着明显的振动，这一现象与智能作战机器人一代原理样机实验结果相符。同理，也给运动云台俯仰摆动蜗杆蜗轮间添加接触，再进行仿真，可得蜗杆蜗轮间的接触力如图 5.39 所示。

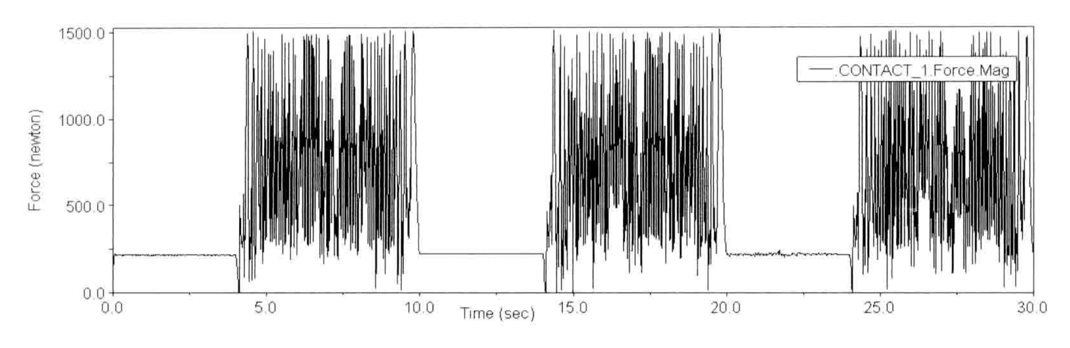


图 5.38　周转齿轮间的接触力分布示意图

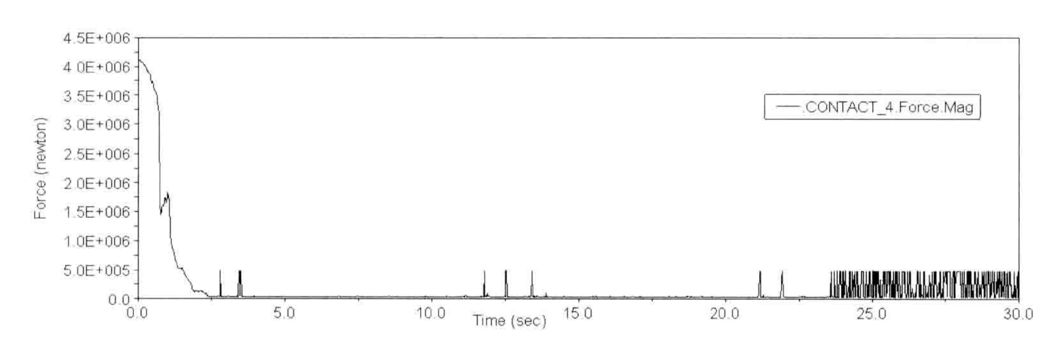


图 5.39　蜗轮蜗杆间的接触力分布示意图

由图可知，蜗轮蜗杆在运动后期也存在着振动。

5.4　落地速度、角度对智能作战机器人自动展开性能的影响

对于经多种运载工具或技术手段投放撒布的智能作战机器人来说，其着陆瞬间的自动展开性能与其在着陆时的速度与角度密切相关。如果机器人着陆速度过大，可能会因冲击力过猛而造成弹上重要器件破损；如果机器人着陆速度过小，可能会因冲击力过弱而不能触发自动展开机构。同样，如果着陆角度太小（着陆角是指机器人基座轴线与地面之间的夹角，垂直着陆时，着陆角定为 90°），也会削弱机器人的自动展开能力，导致系统不能正常展开。

5.4.1　落地速度对智能作战机器人自动展开性能的影响

当智能作战机器人虚拟样机模型建立完毕并对有关参数进行设定后，开始进行仿真实验，内容是测试不同着陆速度对机器人自动展开性能的影响。对应不同着陆速度，机器人支撑板自动展开的有关仿真结果分别如图 5.40～图 5.42 所示。

图 5.40 和图 5.41 描述了在着陆速度分别为 3 m/s 和 7 m/s 时智能作战机器人虚拟

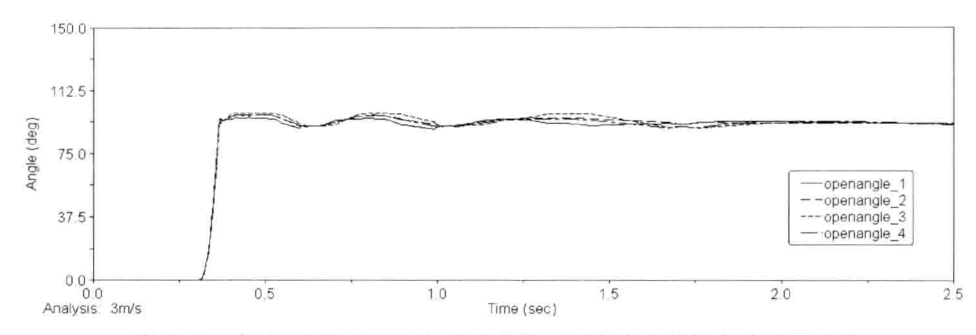


图 5.40 虚拟样机以 3 m/s 的速度着陆时机器人支撑板自动展开过程

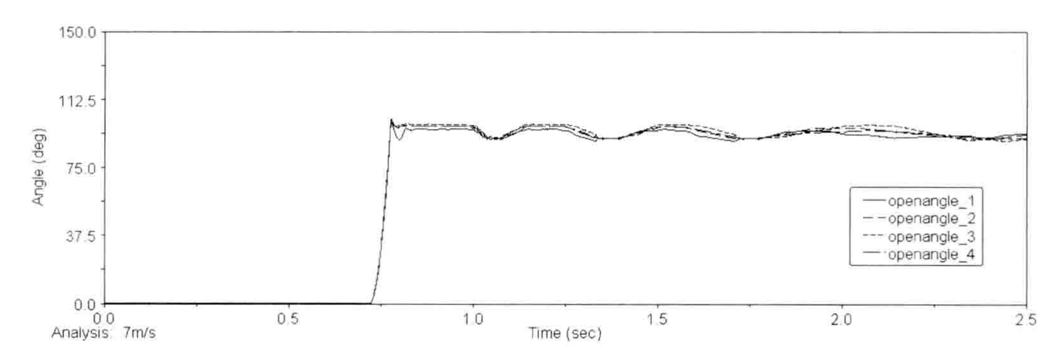


图 5.41 虚拟样机以 7 m/s 的速度着陆时机器人支撑板自动展开过程

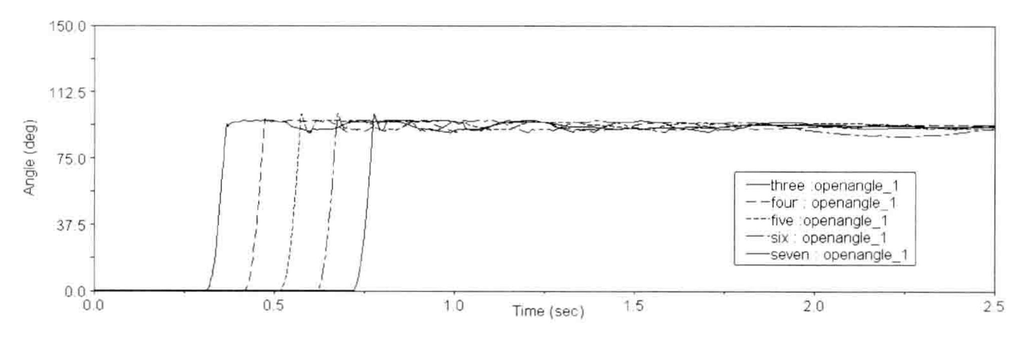


图 5.42 不同着陆速度时虚拟样机同一支撑板自动展开过程比较

样机支撑板的自动展开过程，图 5.42 则显示了机器人某一支撑板在以不同速度（共 5 种，分别为 3 m/s、4 m/s、5 m/s、6 m/s 和 7 m/s）着陆时的展开情况比较图。仿真结果表明，在 3 m/s 到 7 m/s 的着陆速度范围内，机器人支撑板均能顺利展开，满足设计要求。同时，还可以发现，在展开过程中每一种着陆速度下四个支撑板展开角度随时间变化的趋势一致，这与目标落在硬质地面上四个支撑板应同时展开的情况相符。

另外，在智能作战机器人基座上选取四个点作为参考点来测试基座与地面的相对距离，通过仿真，可得图 5.43 所示结果。

由图 5.43 可以看出，这四个参考点所对应的四条曲线在大部分时段是一致的，但

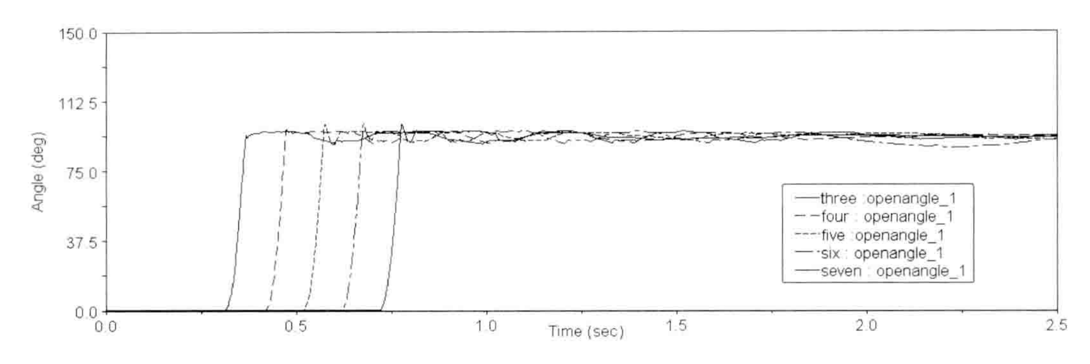


图 5.43　着陆过程中机器人基座与地面相对距离示意图

也存在细微差别。比如，在图 5.44 所示局部放大图中可以清楚看出，在第一次触地后，曲线在竖直坐标方向有了差别，原因是机器人在水平面内的质量分布不均匀。所以，在智能作战机器人安装调试过程中，要使其在水平面内的质量分布尽可能均匀，保证在各点所受冲击力大小一致。

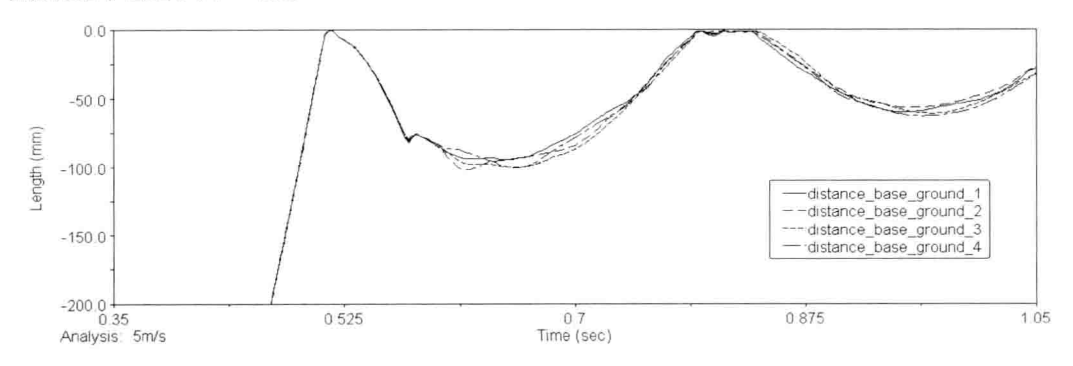


图 5.44　着陆过程中机器人基座与地面的相对距离局部放大图

图 5.45 和图 5.46 描述的是机器人在有缓冲作用或无缓冲作用条件下，以 5 m/s 的速度着陆时基座在竖直方向上的加速度情况。机器人在着陆后，由于急剧减速，会产生

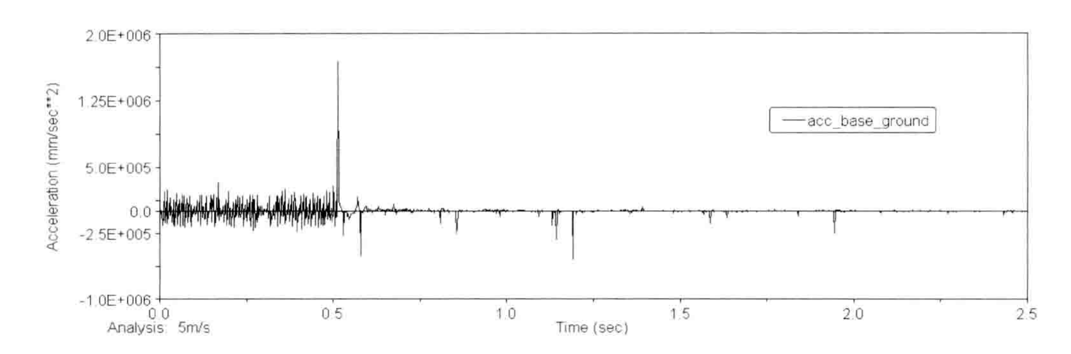


图 5.45　机器人以 5 m/s 的速度着陆时（无缓冲作用）基座在竖直方向上的加速度情况

很大的加速度，进而产生冲击。由于冲击可能会造成弹上器件损坏，故对加速度的数值进行控制就显得极为重要。在基座上加装缓冲垫可在一定程度上减小冲击，防止破坏。

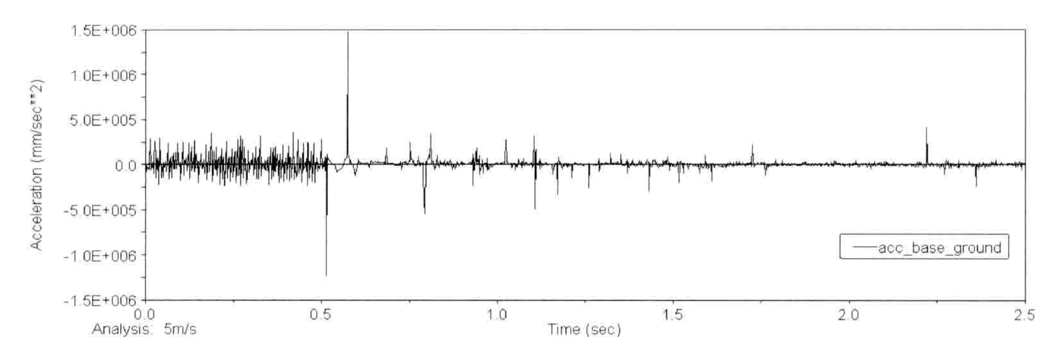


图 5.46 机器人以 5 m/s 的速度着陆时（有缓冲作用）基座在竖直方向上的加速度情况

5.4.2 落地角度对智能作战机器人自动展开性能的影响

由于智能作战机器人从高空投放撒布落下时，存在着一定的着陆角度，可能因冲击力达不到要求而不能展开（由于着陆角度的原因而导致弹簧压缩程度不够，支撑板不能展开，此种情况下装置失效），也可能存在支撑板打开而机器人却仍然倒下的情况，此时必须依靠扭簧将装置扶正，所以设计合适的扭簧成为成败的关键。

此前，已设定支撑板扭簧刚度为 33.35 N·mm/（°），由于此刚度不能保证在单个支撑板工作的情况下也能使机器人扶正，因而为了保证机器人在最坏情况下（仅依靠一个支撑板扶正展开，见图 5.47）也能够正常工作，就要求扭簧具有足够的力矩。于是，可将扭簧的刚度设定为 130 N·mm/（°），并在 Adams 虚拟环境中进行仿真，其仿真结果如图 5.48 所示。

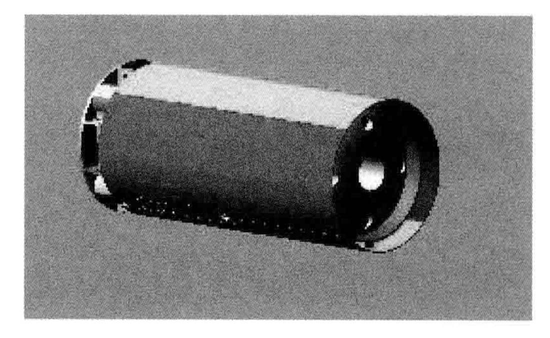


图 5.47 机器人依靠单支撑板扶正

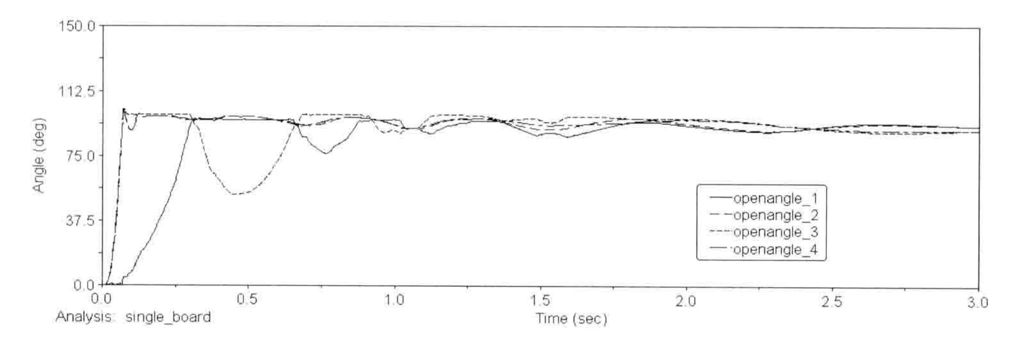


图 5.48 单支撑板扶正过程中各支撑板角度变化仿真示意图

由图可知，与之前机器人在以不同速度着陆时的展开情况不同，四个支撑板展开时间不一样了。其中一个支撑板（openangle_1）明显滞后于其他三个支撑板，从图中还可以看出，机器人能顺利展开，由此可知所设计的扭簧满足功能要求。唯一不足的是，此弹簧刚度值太大，对扭簧要求太高，需进行改进设计和优化取值。

既然智能作战机器人能够依靠单侧支撑板顺利展开，现在主要的问题就是要知道机器人着陆时能够顺利展开的最小着陆角。经仿真分析发现，机器人在着陆角为 50°～90° 范围内均可顺利展开，满足智能作战机器人总体性能要求。现以着陆角为 50°时的情况为例进行验证，其仿真结果如图 5.49～图 5.51 所示。

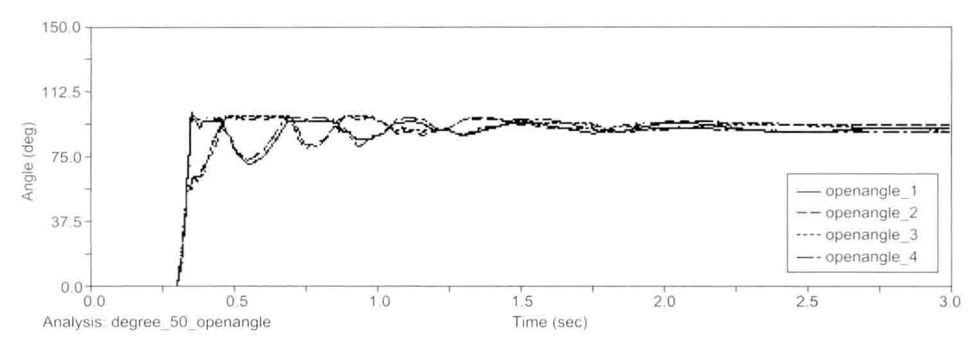


图 5.49　着陆角为 50°时机器人着陆展开过程示意图

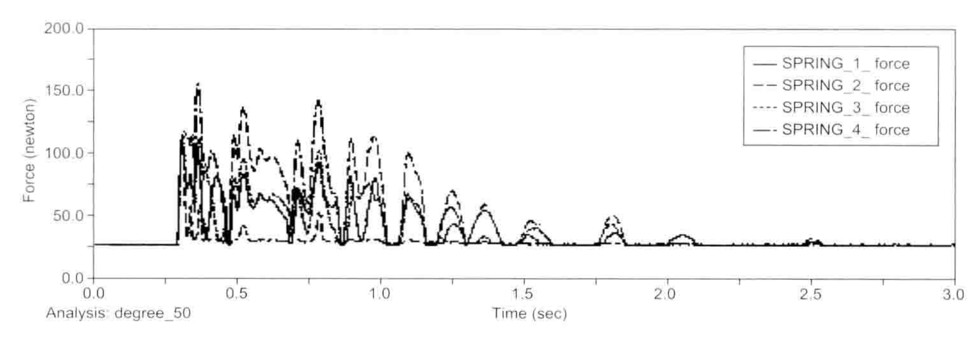


图 5.50　着陆角为 50°时基座承重压缩弹簧受力示意图

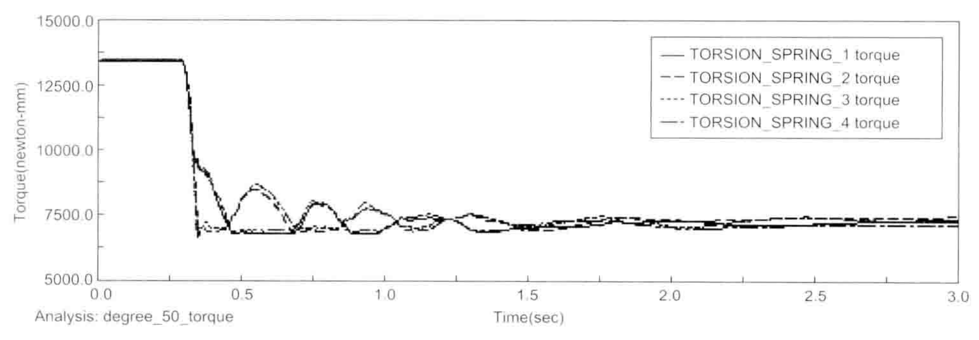


图 5.51　着陆角为 50°时支撑板扭簧受力示意图

5.5 原理样机综合性能测试实验

经过数年的技术攻关和原理探索，终于成功研制出了智能作战机器人一代原理样机，该原理样机在有限的体型尺寸下不仅功能丰富，性能出色，而且全机质量仅为14 kg，真正实现了体积小、质量小、功能全、性能好、能耗省、成本低等设计目标。在该原理样机制作完毕以后，根据所设计的软件控制算法，对智能作战机器人进行了除点火发射之外的整体作业实验，整个实验过程包含了运动云台的全视场扫描、目标采集与识别、数据通信和云台的瞄准定位等，并对瞄准误差进行了测试，实验项目几乎囊括了智能作战机器人所有的基本动作控制单元，实验效果的评价指标和评价角度包括运动完成情况、工作效率、运动稳定性和控制精度等诸多方面。下面结合具体测试分别予以介绍。

5.5.1 运动云台全视场扫描运动测试

由于智能作战机器人是抛撒着陆展开后才开始作业的，因此，在进行机器人本体运动实验之前，先对机器人的抗振动性能进行了测试。该测试主要是对智能作战机器人施加短时外部冲击，发现机器人展开后仍能顺利达到期望位姿，主控芯片及各控制子系统工作状态良好。表明智能作战机器人具有很好的抗振动能力，从而充分保证了后续作战任务的有效进行。

智能作战机器人在着陆展开后，其装载在运动云台上的视觉观瞄器件可通过云台沿水平角方向与俯仰角方向的扫描运动，分幅分层对360°全视场范围内的周边景物进行扫描，而且运动云台的整个扫描运动连续、平稳、迅速、准确。图5.52显示了运动云台在全视场扫描运动的15 s内两个驱动电动机的运动轨迹，在该段时间内，两个驱动电动机密切配合，实现了运动云台驱动视觉观瞄器件完成“俯仰角方向转动20°→水平

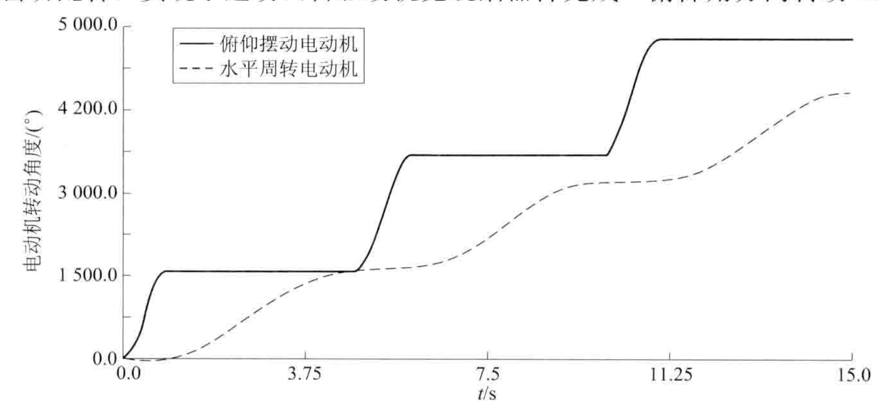


图5.52 全视场扫描运动云台电动机位置曲线

角方向转动 360°→俯仰角方向转动 30°→水平角方向转动 360°→俯仰角方向转动 30°→水平角方向转动 360°”这样一次连续的运动过程。

图 5.53 显示了原理样机在不同扫描阶段的实际运动效果。由图 5.53 可以清晰地看出，所研制的智能作战机器人一代原理样机在对周边景物作分幅分层连续扫描时，动作流畅，启停迅速，工作稳定，姿态正确，完全能够根据智能作战机器人在图像采集、目标识别方面的实际需求，实现特定的扫描运动，为智能作战机器人在非结构环境下迅速、可靠、稳定、准确地完成预期的洞库作战使命创造了有利的条件，也为后续二代实用样机的开发奠定了良好的技术基础。

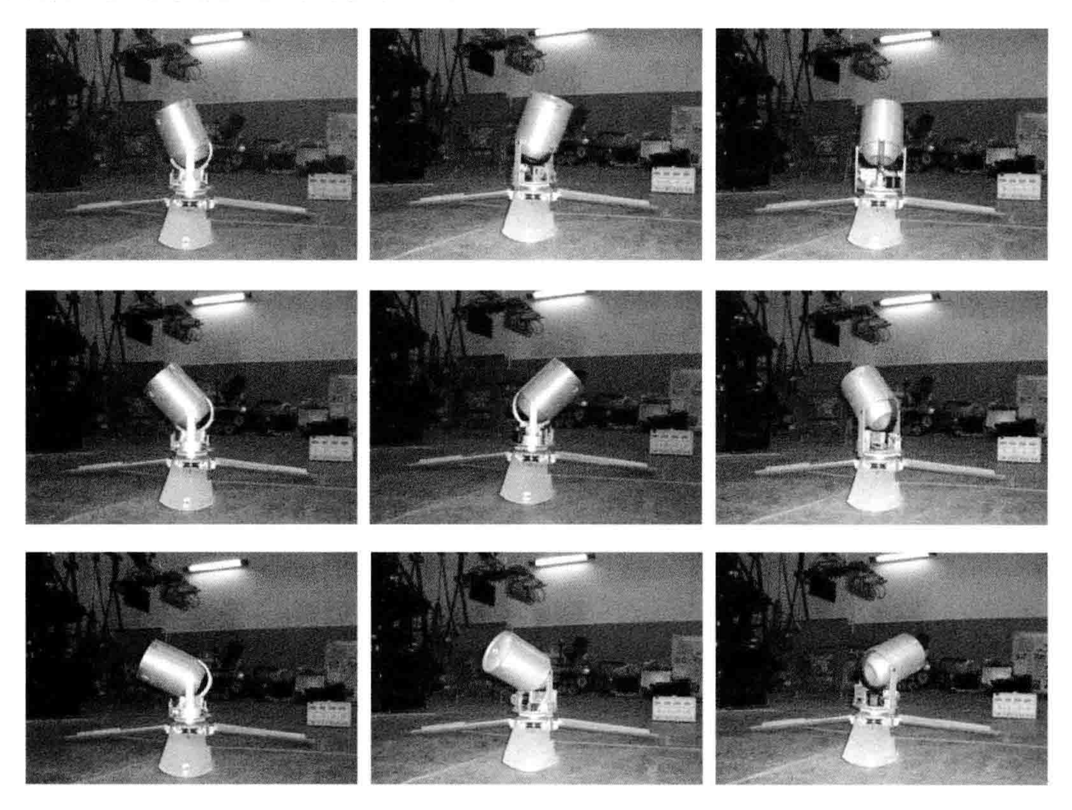


图 5.53　智能作战机器人全视场扫描过程截图

5.5.2　运动云台运行时间与加减速测试

由于运动云台控制系统是在接收到多媒体处理芯片的位置信号后，通过控制器、驱动器和电动机来完成相应的运动过程。因此，通过对电动机实际运转情况的检测，就可以对双 DSP 的通信效果、电动机加减速的控制策略和云台响应时间进行综合评价，而电动机的运转是根据控制程序设定的 DSP 控制端口发送的特定 PWM 波来控制的，这就需要对电动机控制程序进行测试，具体测试内容是利用示波器来检测 DSP 是否在设

定的时间内能够输出精确的脉冲波形和脉冲个数。

该实验使用的设备包括：智能作战机器人原理样机、示波器一台、PC机一台、JTAG仿真器一个、CCS V3.3软件一套、导线若干。实验过程分为三步：首先，将弹载中央处理器TMS320DM6437通过JTAG仿真器与PC机连接，利用CCS V3.3软件进行测试程序的烧写（该程序将通过双DSP通信控制云台转过最大角度，即俯仰角转动80°，然后水平角再转过360°）；其次，将弹载中央处理器TMS320F28015的EPWM1A和EPWM3A口分别接到示波器的信号输入口，再将示波器的地与DSP系统板的GND引脚相连；最后，调整示波器量程，系统上电运行，运动云台在工作范围内完成最大角度转动，观察并存储示波器波形信息。

在运动云台驱动机器人发射筒俯仰摆动80°后，由示波器采集到的脉冲波形如图5.54所示。

由图5.54可以看出，脉冲宽度在不断地变化，刚开始时，脉冲宽度逐渐变窄，之后又逐渐变宽，正好对应着预期的电动机加速-减速曲线，此时的脉冲波形持续时间为3.75 s，波形频率为500 Hz，波形个数为1 875个。此后，运动云台再驱动机器人发射筒沿水平角方向转动360°，由示波器采集到的脉冲波形如图5.55所示。由该波形图可以看出，脉冲宽度在刚开始时逐渐变窄，然后脉冲宽度保持了一段时间，之后又逐渐变宽，正好对应着预期的电动机加速-匀速-减速的加载曲线，且此时的脉冲波形持续时间为4.694 s，波形总数为2 347个。因此，运动云台单方向的最大调整时间为4.694 s，整体运动的最大调整时间为8.444 s。

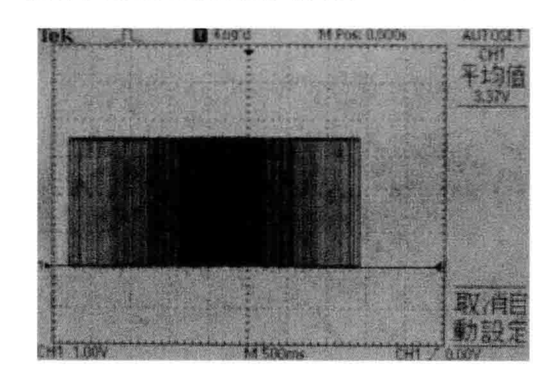


图5.54　俯仰角方向脉冲波形图

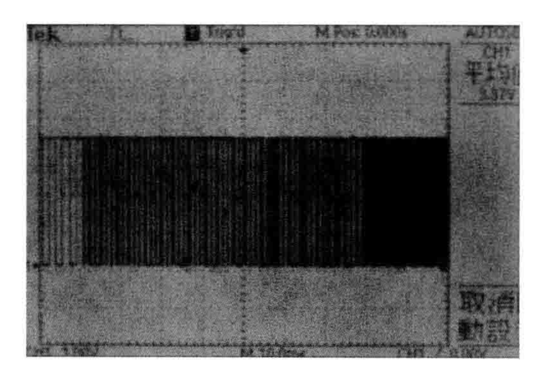


图5.55　水平角方向脉冲波形图

综上所述，根据示波器输出的脉冲波形可知，无论在时间的响应上，还是在双DSP的通信和电动机的加减速运动控制上，智能作战机器人运动云台都很好地实现了系统的性能指标要求，这也充分说明了相应控制算法和软件设计的合理性。

5.5.3 运动云台瞄准精度测试及误差分析

由于运动云台采用的控制方式为精度无法保证的开环控制系统，因而决定通过样机

实验来测定系统的瞄准精度，分析其误差是否在系统要求的参数范围内，并寻找提高控制系统性能和精度的相关方法。另外，尽管在此前的实验中验证了步进电动机控制程序的正确性，但仍不能保证在运动云台带载运行情况下的转动实际值和理论值是一致的。因此，有必要利用智能作战机器人原理样机驱动负载来测试其实际性能，尤其是转角的误差指标，同时，还可以通过测试，观察电动机在运行过程中是否有振动、失步和过冲等现象出现，为进一步提高中央联合控制系统的整体性能提供依据。

本实验中主要用到的设备有：智能作战机器人原理样机、光电编码器、数字式计数器、PC 机、USB 数据连接线、联轴器、支架、直流稳压电源。测试过程主要是通过光电编码器对运动云台的转角进行测试，实时观察电动机的运行状态，将数据采样汇集后进行分析和比较。光电编码器的内圈每转过一定的角度，就发出脉冲信号，通过对这些脉冲信号进行计数，就可以得到实际的转角值。

实验过程按如下步骤进行：

① 在智能作战机器人原理样机上安装光电编码器。将机器人发射筒和光电编码器的内圈通过联轴器相连，光电编码器的外圈固定在支架上。

② 连接光电编码器和计数器。将光电编码器的信号线和电源线分别接在计数器的 1～4 引脚上。光电编码器的光栅刻线数为 3 600，分辨率为 0.1°，即每转动 0.1°，A 相线和 B 相线都输出一个脉冲，通过计数器记录输出的总脉冲数，就可以计算出电动机的实际转角值。数字计数器的位数为 7 位，配合光电编码器使用，可记录的最大转角达 999 999.9°，完全满足实验系统的使用要求。

③ 进行转角测量并存储。检查连接无误后，对光电编码器、计数器和智能作战机器人原理样机上电，通过 DSP 在不同转角时对应输出的 PWM 控制信号，分别对云台在水平方向上和垂直方向上不同转角值进行测试并存储。

④ 通过 USB 数据线将计数器存储的转角值下载到 PC 机上，利用 Matlab 软件将实测值与理论值进行比较，得出两方位不同转角下的瞄准误差曲线。

上述实验所用到的测试系统如图 5.56 所示。

经过反复调试和深入观察发现，在运动云台启停过程中，以设定的启动频率和停止频率可以很好地实现启动和停止，说明电动机启停频率预留的余量足够；在高速匀速运行阶段，运行平稳，振动和噪声都较小；在加减速运行阶段，振动和噪声比匀速时大，以加速过程的振动和噪声最大，但均未出现明显的失步和过冲现象；改变驱动器细分数可以很好地改善电动机的运行效果，但存在运行稳定性与运行效率的矛盾，其中，当细分数取 16 时，因与电动机发生共振，噪声和振动最大。

最后，通过将采样数据与理论转角进行比较，得到水平方向与俯仰方向终端执行机构的转角误差，如图 5.57 所示。

在最大工作范围内，水平周转方向与俯仰摆动方向的转角最大值所对应的误差分别为 0.477°和 0.091°，均小于 1.2°（该误差指标为图像识别中全景拼接所允许的误差最

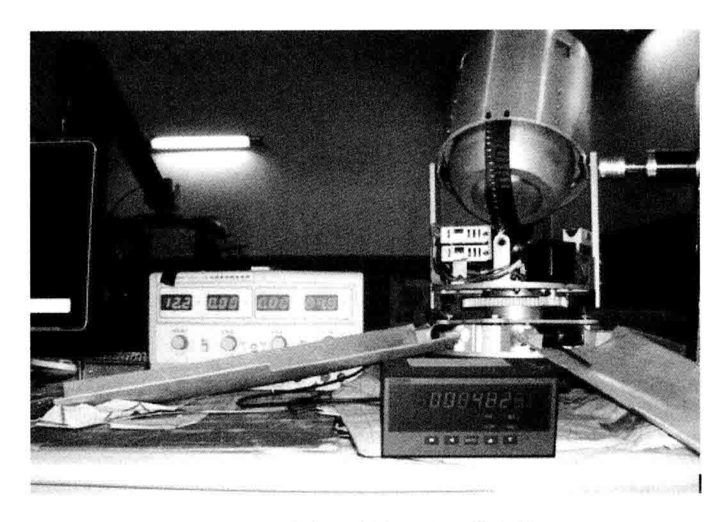


图 5.56 测试实验的系统总体连接图

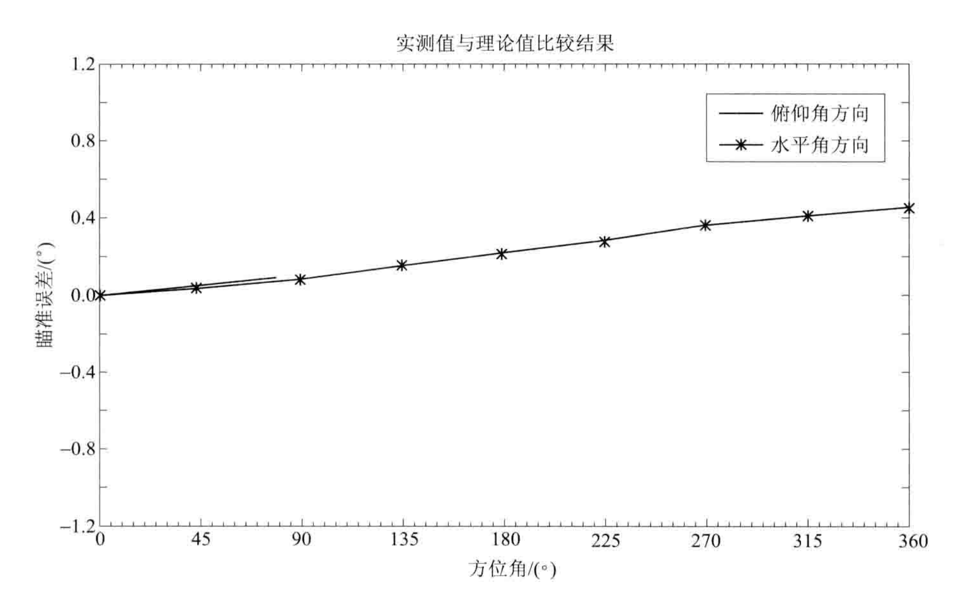


图 5.57 方位瞄准误差曲线

大值），该误差是可以接受的，满足智能作战机器人对运动云台转角运动的控制精度要求，从而保证了运动云台运行与定位的精确性。

根据上述实验结果及实验过程中反复进行现场调试和观察，对误差来源、影响因素和改进措施分析如下：

① 实际转角总小于理论转角，且随转角增大，误差均随之增大。一方面，这与编程过程中的舍入误差有关，因脉冲数均按整数来处理，导致角度增大，计算次数越多，舍入误差也越大，此现象可通过分区段增发脉冲的方式予以适当弥补；另一方面，还与

系统的测量误差有关，因云台在加速过程中振动稍大，会导致光电编码器的测量误差也随之增大，通过加固光电编码器再测量时，发现误差有所减小。

② 加速过程的加速阶数和步数太少时，速度突变现象明显，会导致系统运行时的振动和噪声增大，运动不平滑，情况严重时还可能出现失步和过冲现象。可以在保证系统响应时间的前提下，适当增加阶数与步数来改善此现象。但阶数和步数越大，导致加速过程变长，整个系统的响应时间会有所增加，且软件编制也会更复杂。

③ 当驱动器的细分数选择较大时，电动机运行更平稳，动态特性有所提高，而且由算法舍入导致的误差也会减小。但过高的细分数也会影响系统的快速响应性。因此，在满足系统响应时间的前提下，应尽量选择较大的细分数，同时要求电动机具有较大的启动频率和最大运行频率。另外，选择细分数时应避开电动机运行的共振区。

④ 增大传动比可以很好地减小最终误差。通过实验发现，俯仰摆动驱动电动机的转角最大误差要大于水平周转驱动电动机的转角最大误差，但是经过传动机构折算后，前者的最终误差反而更小。此外，大的传动比可以减小电动机驱动力矩，从而能以更高的频率运行，但过大的传动比也会影响系统的快速响应性。

⑤ 当系统长时间运行时，驱动器和电动机等器件都会出现不同程度的发热现象，导致电动机的力矩性能下降。因此，为提高系统长时间工作的性能，应对驱动器和电动机等发热器件进行散热处理，如加散热片或在其表面涂抹硅胶等。

⑥ 机械零件的加工误差会使整个运动云台的运动存在偏差，但该偏差是固定的，可以通过后期的运动控制予以补偿。在保证零件加工精度的前提下，装配过程中对支架各轴承的径向及轴向游隙的控制，也会影响执行端的定位精度。

⑦ 机器人支架因承受重物会产生弯曲变形，导致运动云台出现定位和瞄准误差。所以云台支架的弹性变形也是执行端定位精度产生误差的来源之一。

⑧ 在非结构工作空间内，有时环境与理想状态相比差别较大，从而使瞄准定位产生误差，如温度变化产生的机械结构变形和倾斜，地面产生的重心偏移等情况，这些都需要认真对待和妥善处理。

5.6　电源管理系统节能设计的仿真实验

5.6.1　Simulink/Stateflow 软件的应用

Simulink 是基于 Matlab 的强大的系统建模与仿真工具，利用 Simulink 可以非常方便、直观地进行系统建模和仿真，同时还可以结合 Realtime 工具箱进行实时仿真。在 Simulink 中建立连续或离散系统都很方便，但对于存在离散事件驱动的系统或者分段连续的系统则显得有些麻烦，而这些工作利用 Stateflow 则很容易实现。Stateflow 是一个基于有限状态机理论的图形化建模、仿真环境，构建在 Matlab/Simulink 之上，通过

状态流程和事件驱动实现对离散事件系统的仿真。有限状态机理论提供了描述和控制应用逻辑的非常强大的方法，很多复杂的逻辑可以在一张小图表中表述，规则简单，可读性和可验证性很强。Stateflow 实现了有限状态机代码的自动生成，用户只需在 Stateflow 的设计界面绘制状态转移图和流程标识，由 Stateflow 生成 Simulink 的仿真代码，仿真时还可以非常直观地观察状态转换过程，便于调试和修改，并且也能和 Realtime 工具箱紧密集成，直接生成目标代码进行半实物仿真。

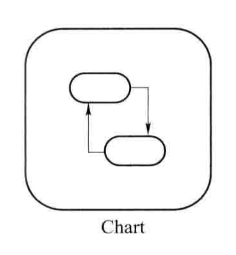


图 5.58　Stateflow 模块

Stateflow 是图形化设计工具，每个状态自动机用一个图（Chart）来表示，每个图在 Simulink 中封装成一个如图 5.58 所示的模块。一个 Simulink 仿真模型中可以有多个这样的图，每个图都有自己的输入/输出以及内部的数据和状态。

在 Simulink 中，双击 Chart 模块就可以打开一个如图 5.59 所示的 Stateflow 编辑界面，在界面中可以完成所有的设计和编辑工作，仿真运行时还可以在该界面下观察状态流程。一个 Stateflow 图由图形对象和非图形对象构成，图形对象包括状态（State）、转换（Transition）、节点（Junction）、图形函数（Graphical function）等，而非图形对象则包括数据（Data）和事件（Event）的定义。

图 5.59　Stateflow 编辑界面

1. 状态对象

状态在 Stateflow 图中表示系统的模态，当状态被激活时，系统则将工作在这个模态上。状态的激活情况由事件来驱动。状态可以是超状态或子状态，如果一个状态包含其他状态，则称为超状态；反之，为子状态。

状态的激活可以有异步和同步两种模式，异步模式每次只有一个状态被激活，而同步模式可以有多个状态同时激活，缺省为异步模式，同步模式的状态用虚线框表示。由于状态存在超状态和子状态的层次结构，因此，可以构造异步模式和同步模式同时存在的非常复杂的控制逻辑。

2. 状态转换

状态转换在 Stateflow 图中也是一种对象，用有向箭头曲线表示，用于连接任意两个图形对象。状态转换必须有源模块和目标模块，但也有一个特殊的转换，即缺省转换，它只有目标模块，其源模块端用一个实心圆点表示（图 5.59）。仿真开始时，缺省转换指向的状态将被激活。另外，状态转换的端点也可以是节点，利用节点，可以构造条件转换，在不同事件时转移到不同的状态。只有当源模块为激活状态时，状态转换才是有效的，无效的状态转换不会被执行。

Stateflow 在运行状态转换时的逻辑顺序如下：

① 当有事件发生时，检查当时处于激活状态的流出转换的事件属性是否与当前事件匹配。

② 如果找到匹配的事件，则执行转换的 condition 表达式。

③ 如果 condition 表达式执行结果为真，则执行 condition _ action 操作。

④ 如果目标模块为有效状态，则执行该转换。

⑤ 离开当前状态，当前状态变为非激活状态。

⑥ 执行 transition _ action 操作。

⑦ 进入目标状态，将其激活，这样便完成了一次状态转换，这时，Stateflow 将转入休眠状态等待下一次事件的发生。

3. 事件和数据

在状态图编辑环境下，选择“tools”菜单中的“Explorer”选项，可以打开一个如图 5.60 所示的浏览器，在该浏览器中可以管理状态图中所有的事件和数据。

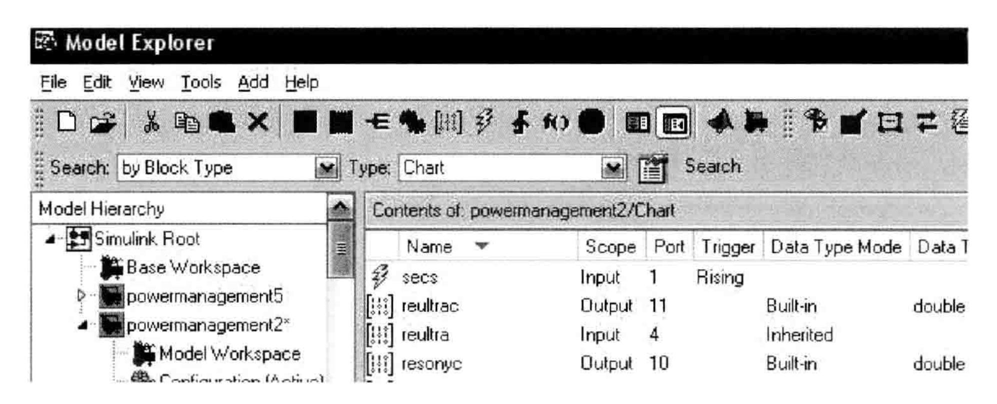


图 5.60　事件和数据浏览器界面图

Stateflow 是事件驱动的，事件是其最基本的行动元素，Stateflow 中的事件可以分为输入事件、本地事件和输出事件 3 种，在浏览器的 scope 栏可以更改事件的属性。

输入事件可以分为边缘触发和函数调用两种。两者的区别在于，边缘触发事件仅在下一个仿真步长开始时被接收模块注意到，而不管这个事件实际上发生在自前一个仿真时刻以来的什么时刻；而对于函数调用事件，接收模块可以在事件发生时注意到，即使事件发生在仿真步长的中间。边缘触发事件与触发子系统（trigger subsystem）有些类似，可以分为上升沿触发、下降沿触发和双沿触发。

Stateflow 状态图拥有自己的变量空间，与函数的变量空间类似。其中的数据也可以分为以下几种类型：本地数据、输入数据、输出数据和临时数据。本地数据只在状态图中可见，输入和输出数据有与 Simulink 通信的端口，可以与 Simulink 中的数据进行交互。另外，在无状态图和图形函数中还可以定义临时变量，这些变量仅在图或图形函

数激活时才是有效的。

5.6.2 电源管理过程的动态建模与仿真

在智能作战机器人的各子系统中，主要的耗能部件为驱动运动云台旋转的电动机及其驱动电路和负责探测与识别的视觉传感器及视频处理部分，特别是由于目标出现的不确定性，决定了发火攻击前上述两系统耗能的不确定性。因此，只要能够合理确定上述系统的工作时间和空闲时间，就能使智能作战机器人的电源系统具有很大的节能空间，而且该系统的工作特性也非常适合于采用固定超时算法对其组件进行未来空闲时间的预测，并进而探索智能作战机器人整个用电系统的节能问题。

1. 电源系统管理过程的动态建模与仿真

根据系统设计方案，搭建如图 5.61 所示的智能作战机器人电源管理系统的仿真模型。图中，Constant 0 和 1 分别代表智能作战机器人的视觉观瞄器件未发现目标和发现目标，以此信号来作为仿真输入的 RES；图 5.61 中间的 Chart 部分是 Stateflow 框图，动态模拟电源管理系统根据是否检测到目标来控制各个子系统的工作过程；图中 CaC、MC 是 Stateflow 的数据输出，分别模拟图像采集装置和云台电动机的控制信号；ca _ energy 和 m _ energy 分别是状态图给出的当前图像采集装置和云台电动机功耗值，图中将二者相叠加给出了总体能量消耗值。

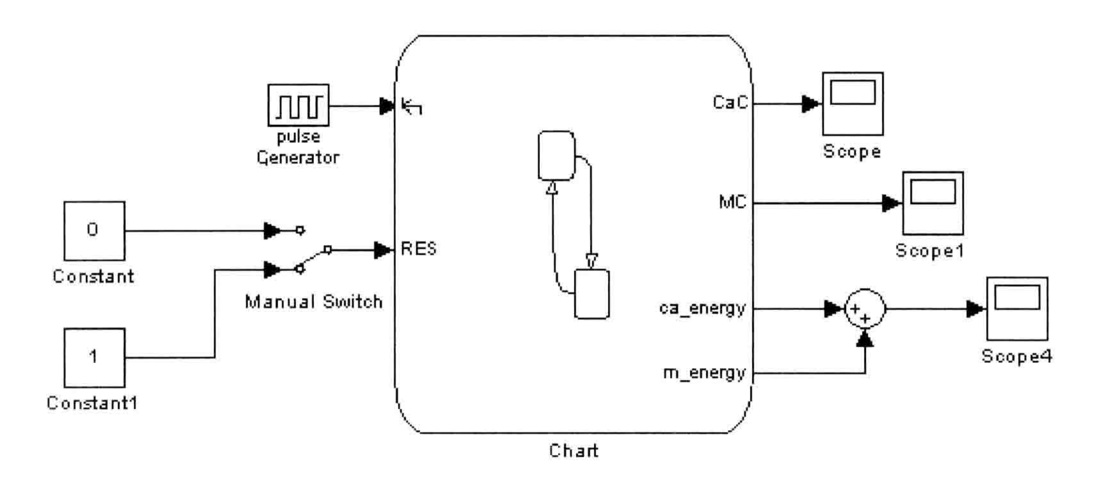


图 5.61 电源管理系统动态管理组件仿真模型

2. 电源管理系统的能量流动过程

根据智能作战机器人电源管理系统的具体情况，建立动态电源管理的 Stateflow 框图模型，如图 5.62 所示。

以图 5.62 所示模型为基础对电源管理进行动态仿真，图中左半部分为系统工作状态 WORK，右半部分为系统空闲状态 IDLE，运动云台器件的功率为 10 W，探测子系

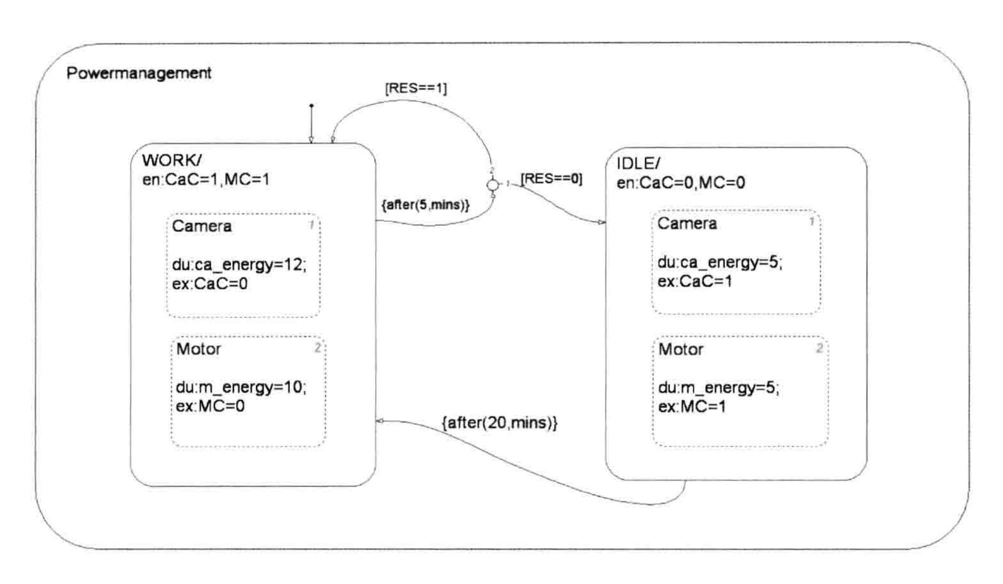


图 5.62　智能作战机器人动态电源管理的 Stateflow 框图模型

统的器件功率为 12 W。由 Stateflow 的介绍可知，通过相应的设置可使智能作战机器人系统启动时即刻进入工作状态 WORK，该状态图包含了两个并联的同步状态，进入该状态后通过“en：CaC=1，MC=1”给出视觉观瞄器件和运动云台电动机的工作控制信号，并通过电源芯片对各自的组件供电。而 IDLE 也给出了两个并联的同步状态，进入该状态后，通过“en：CaC=0，MC=0”给出视觉观瞄器件和运动云台电动机的工作控制信号，并通过电源芯片对各自的组件停止供电。

当系统未检测到目标时的状态转换情况如图 5.63 和图 5.64 所示。黑色加亮框图表明该部分正处于有效状态。通过用 after 函数来使用超时算法控制转换条件及时间。

如果上述图中左半部分加亮，表明系统正处于 WORK 工作状态，例如从图 5.63 中可以看出智能作战机器人视觉观瞄器件和运动云台电动机都在工作，通过“du：ca_energy=12；”和“du：m_energy=10；”，设定了工作状态下的视觉观瞄器件和运动云台电动机的能量消耗，此时系统处于工作状态，所以会保持对视觉观瞄器件和运动云台电动机的控制电路所对应的地址写 1（即系统的输出 CaC=1，MC=1），进而一直处于供电状态，相应的能量消耗通过 ca_energy 和 m_energy 传递到工作空间进行处理。“ex：CaC=0”和“ex：MC=0”是系统退出该状态时将控制信号清零。如果图中右半部分加亮，表明系统正处于 IDLE 空闲状态。例如从图 5.64 中可以看出，通过“du：ca_energy=5；”和“du：m_energy=5；”，设定了空闲状态下的视觉观瞄器件和运动云台电动机的能量消耗，此时系统处于空闲状态，所以会保持对视觉观瞄器件和运动云台电动机的控制电路所对应的地址写 0（即系统的输出 CaC=0，MC=0），系统不消耗能量。

当系统检测到目标后，RES=1，工作情况如图 5.65 所示，此时系统转换的分支满

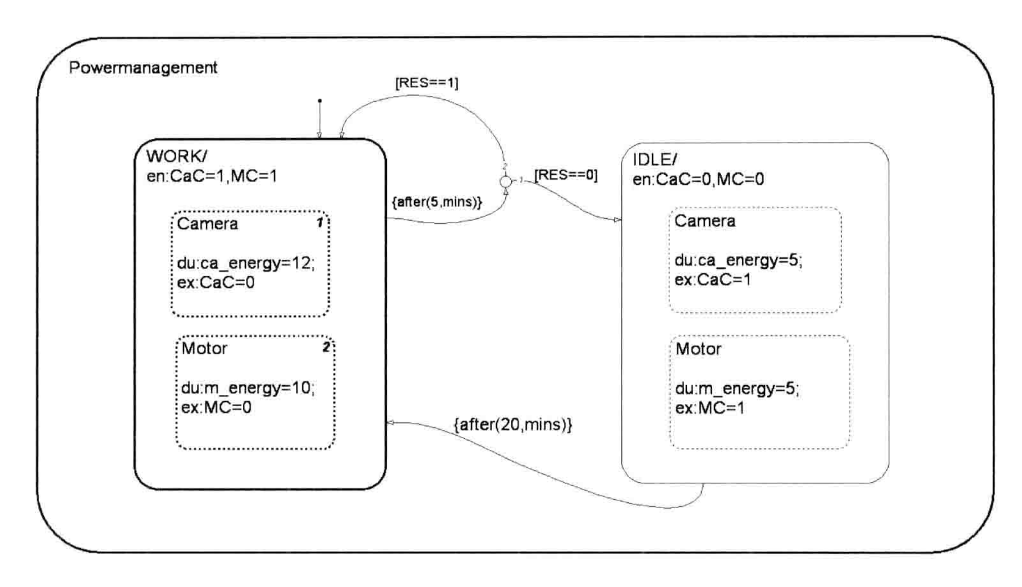


图 5.63 空闲时间不满足时的工作状态及能量消耗情况

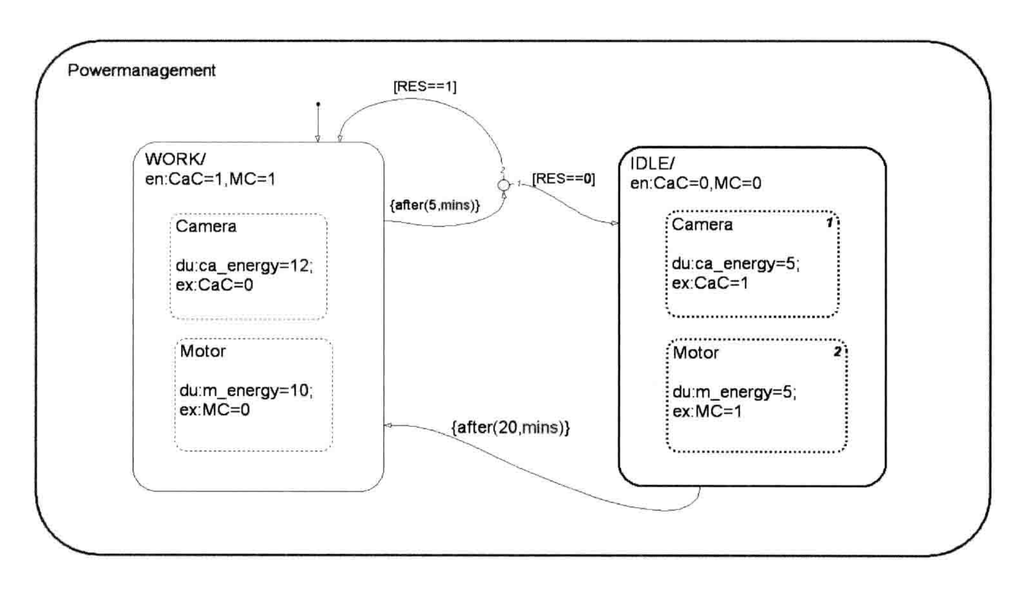


图 5.64 空闲时间满足时的工作状态及能量消耗情况

足 RES=1 的转换条件，故而一直处于 WORK 工作状态，而不会转到空闲状态。表明检测到目标后，系统的各个子系统都一直处于工作状态。

3. C 代码的生成

在所建模型的 Configuration Parameters 对话框中，选取 Real-Time Workshop，并在其中配置相应的选项，生成构建模型的 C 代码。具体过程和步骤是：System target file 选择 grt. tlc；language 选择 C 语言；Make command 选择 make _ rtw；Template

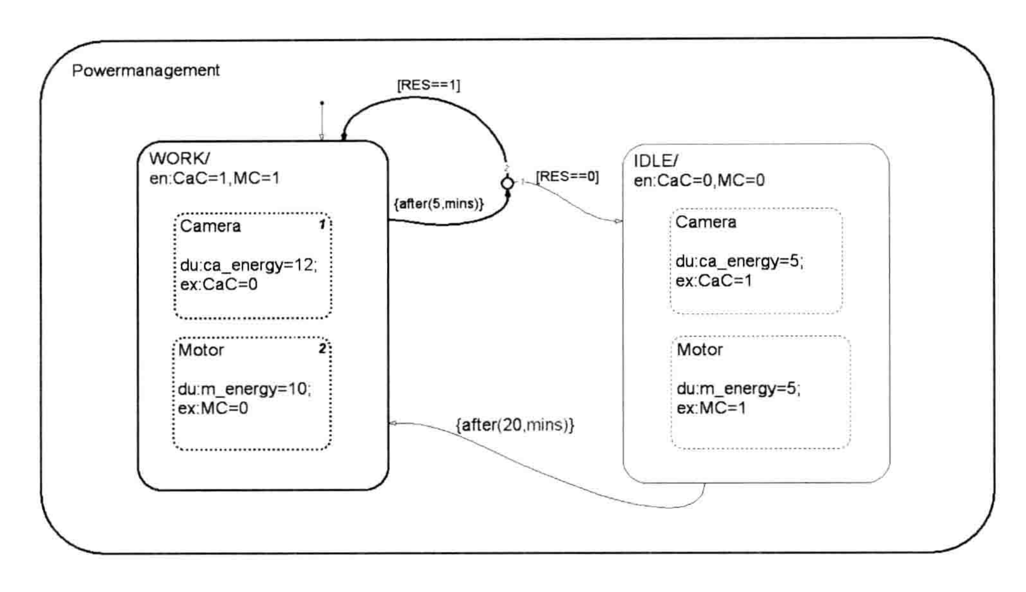


图 5.65　无空闲工作状态及能量消耗情况

makefile 选择 grt _ default _ tmf，配置完成后单击“build”按钮，就可以生成对应于动态模型 C 代码，供以后系统的半实物仿真以及编写控制程序使用。

4. **仿真结果**

系统组件通过空闲时间设置一般都可以满足节能的要求，即使不加入超时算法，只要给定系统固定的工作时间和空闲时间，也可以达到节能的效果。以下数据是在目标短期内未出现需节能工作并对系统工作时间进行经验分析的情况下得到的，图 5.66 表明在超时算法控制下的电源管理的能量消耗情况；图 5.67 表明无超时算法控制的能量消

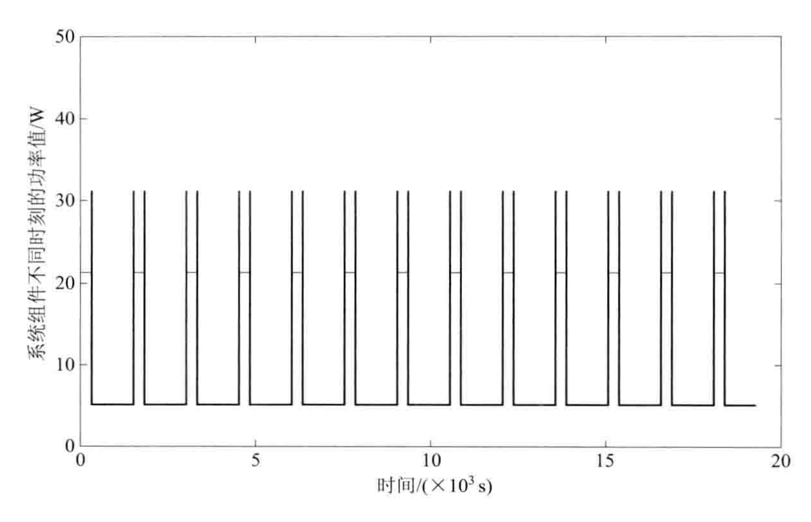


图 5.66　采用固定超时算法控制的能量功耗图

耗情况；图 5.68 表明在无电源管理系统管理下的能量消耗情况，经计算，三者的能耗比值为 1∶1.67∶2.30。

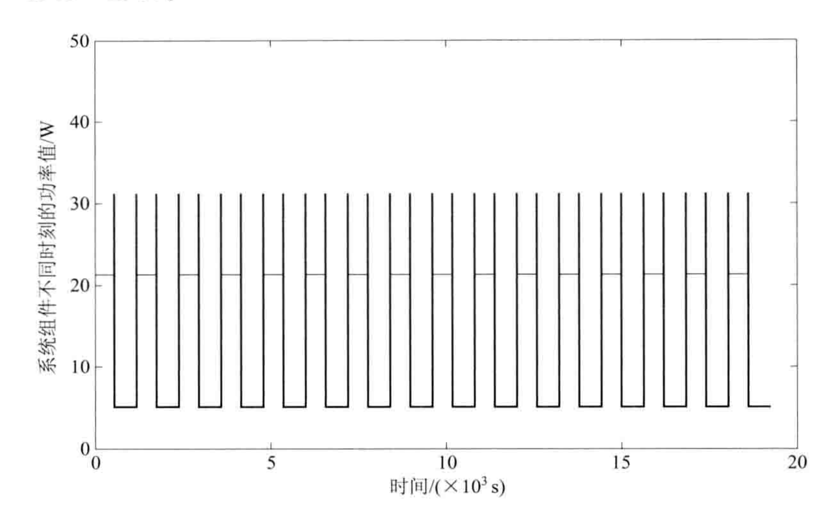


图 5.67　无超时算法控制的能量功耗图

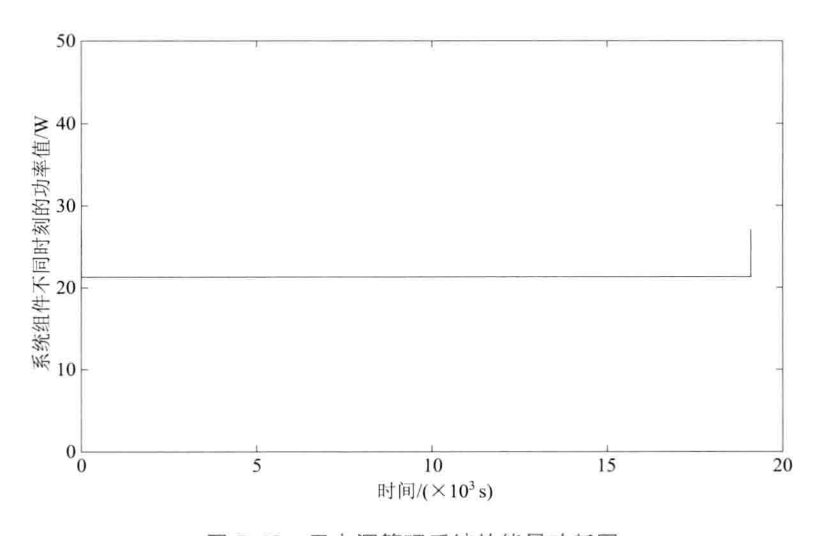


图 5.68　无电源管理系统的能量功耗图

由上述各图可知，当智能作战机器人处于预定工作环境和复杂、人不可及的区域内执行搜索、探测和瞄准任务时，由于外界环境变化的影响，必须经过相应算法的控制进行电源管理才能达到真正的节能效果，否则，单纯的电源管理系统或无电源管理系统均会造成能源的浪费。通过对系统电源管理单元设计的研究，可以将此思想扩展到整个电气系统，这样就可以在满足智能作战机器人预定性能指标的前提下，最大限度地降低其能量消耗。

参考文献

[1] 台湾军事基地揭秘——佳山空军基地［EB/OL］. 中央电视台国际网，2004-11-10.
[2] 台湾地下军事设施纵览［EB/OL］. 军事论坛网，2007-12-23.
[3] 阿富汗的洞穴战［EB/OL］. 中国网，2008-8-22.
[4] 陈文华．国外智能地雷及控制技术的发展趋势［J］. 现代引信，1994（4）：23-26.
[5] 祝石龙．反直升机、反坦克声控智能地雷概述［J］. 制导与引信，2001（4）：31-35.
[6] 王彪．反直升机地雷系统分析［J］. 华北工学院学报，1997（4）：56-59.
[7] 王彪，李世义．浅谈我国反直升机地雷系统的发展［J］. 华北工学院学报，1996（3）：47-51.
[8] 钟逢沂．正在发展中的反直升机地雷［J］. 现代兵器，1991（4）：35-38.
[9] George C. Tillery，Stwver M. Buc. Anti-helicopter Mine System Studies and Analyses［J］. AD-A278337，1999（5）：156-159.
[10] 孙延岭．反直升机雷系统研究及其集成［D］. 南京：南京理工大学，2006.
[11] 王勇．反直升机智能雷角跟踪研究及转向系统设计［D］. 南京：南京理工大学，2005.
[12] 王勇，王晓鸣，李文彬．基于双智能雷的目标跟踪方法研究［J］. 探测与控制学报，2006（2）：29-32.
[13] 杨亦春，程翔，陈庆生．智能雷弹被动声定位精度问题［J］. 弹道学报，1999（3）：56-60.
[14] 喻江波．反直升机智能雷随动系统的研究［D］. 南京：南京理工大学，2002.
[15] 日本杂学研究会．117 个不可思议的人体数字奥秘［M］. 南宁：广西科学技术出版社，2008.
[16] 刘晓玉，方康玲．基于图像的机器人视觉伺服控制［J］. 武汉科技大学学报，2006，29（5）：35-47.
[17] Gonzalez R C. Digital Image Processing-Second Edition［M］. 北京：电子工业出版社，2005，62-63.
[18] 谢再红，朱森第．机器视觉将是推动中国制造业发展的关键技术之一［EB/OL］. 中国视觉网，2007-3-15.
[19] 刘钦，晏明辉．寻找二值图像邻域的一种快速方法［J］. 计算机应用与软件，2005（5）：32-36.
[20] 张忠霞．美国凤凰号探测器登陆火星［EB/OL］. 新浪网，2007-8-4.
[21] 美国火星探测器机器人“机遇”号发射成功［EB/OL］. 人民网，2003-7-8.
[22] 美军大批军用机器人涌向战场［EB/OL］. 军事论坛网，2008-4-3.
[23] 卡内基·梅隆大学建造无人月球勘测车［EB/OL］. 中国探月网，2007-10-15.
[24] 机器视觉促进工业检测从自动化迈向智能化［EB/OL］. 自动识别通商网，2009-6-29.
[25] 绿睿科技公司研发的车牌识别系统［EB/OL］. 中安网，2009-4-10.
[26] 专家为你揭示机器视觉选择标准以及技术发展的十三大趋势［EB/OL］. 模拟混合信号资讯网站，2005-6-27.
[27] 曹勇刚．智能作战机器人控制系统关键技术研究［D］. 北京：北京理工大学，2009.

[28] 高彩．洞库类目标的图像采集和目标识别技术研究［D］．北京：北京理工大学，2008.
[29] 邓星钟．机电传动控制（第三版）［M］．武汉：华中科技大学出版社，2001：5-10.
[30] 朱宇，王伟．步进电动机的应用［J］．微电动机，2002（4）：56-59.
[31] 史敬灼．步进电动机伺服控制技术［M］．北京：科学出版社，2006：78-79.
[32] 王娟．微小型机动平台机器视觉系统关键技术的研究［D］．北京：北京理工大学，2006.
[33] 罗庆生，韩宝玲，赵小川，等．现代仿生机器人设计［M］．北京：电子工业出版社，2008.
[34] 喻江波．反直升机智能雷随动系统的研究［D］．南京：南京理工大学，2002.
[35] 尔桂花，等．运动控制系统［M］．北京：清华大学出版社，2002.
[36] 智爱娟．步进电动机步距角的软件细分法［J］．电器技术，2002（5）：50-51.
[37] 杨晨光，周永安，沈俊楠．步进电动机驱动源的软件细分控制法［J］．微特电动机，1996（2）：43-44.
[38] 王宗培，程智．新型二相混合式步进电动机系统的动态仿真模型［J］．电工技术学报，1998（4）：19-23.
[39] 史敬灼，徐殿国，王宗培．二相混合式步进电动机模型参数的辨识［J］．电工技术学报，2001（4）：12-15.
[40] Texas Instruments. TMS320x280x Data Manual［EB/OL］．http：//www. ti. com.
[41] 曾义芳．DSP 开发应用技术［M］．北京：北京航空航天大学出版社，2008.
[42] 郑红，隋强强，周星．DSP 应用系统设计实例［M］．北京：北京航空航天大学出版社，2008.
[43] Texas Instruments. TMS320x28xx，28xxx Inter-Integrated Circuit Module Reference Guide［EB/OL］．http：//www. ti. com.
[44] 李为民，邢晓正．基于 DSP 的步进电动机控制系统设计［J］．微特电动机，2001（3）：27-29.
[45] 李艳明，郭宏．步进电动机有源阻尼控制方法研究［J］．电气传动，2007（11）：42-45.
[46] 王宜结．步进电动机自动加减速运行的研究［J］．自动化技术与应用，2004（2）：52-54.
[47] 徐煜明．步进电动机速度控制的研究与实现［J］．工况自动化，2007（2）：81-85.
[48] 李晓菲，胡泓，王炜，等．步进电动机加减速控制规律［J］．机电产品开发与创新，2006（1）：122-124.
[49] Abdessattar B A. Experimental identification of a linear tubular for phase stepping motor［J］．Electrical Machines and Drives. 1996，7（412）：368-372.
[50] Clarkson P J，Acarnley P P. Simplified Approach to the Dynamic Modelling of Variable-Reluctance Stepping Motor［J］．IEE Proc. E. P. A. 1989，136（1）：418-422.
[51] 王晓明，王玲．电动机的 DSP 控制—TI 公司 DSP 应用［M］．北京：北京航空航天大学出版社，2004：37-48.
[52] 刘和平．电动机的 DSP 控制［M］．北京：北京航空航天大学出版社，2003：154-180.
[53] Texas Instruments. TMS320x28xx，28xxx Enhanced Pulse Width Modulator Reference Guide［EB/OL］．http：//www. ti. com.
[54] 谭浩强．C 语言设计（第二版）［M］．北京：清华大学出版社，1999.
[55] Rulph Chassaing. DSP 原理及其 C 编程开发技术［M］．北京：电子工业出版社，2005.
[56] 唐春蓬，王伯铭，张丽．基于 DSP 的步进电动机升降频控制［J］．机械工程与自动化，2007

(12)：103-107.

[57] 何平，李岳，徐小军．基于 DSP 的步进电动机高精度变速控制研究 [J]. 兵工自动化，2007 (11)：86-89.

[58] 杨特有，李亚兰．高性能 DSP 芯片 TMS320F2812 在电动机控制器中的应用 [J]. 电子元器件应用，2006 (8)：82-86.

[59] 李昌坤，李昌龙，何小海．一种新型的智能云台控制系统 [J]. 中国测试技术，2005 (3).

[60] Texas Instruments. TMS320DM6437 Digital Media Processor Reference Guide [EB/OL]. http：//www. ti. com.

[61] 江思敏，刘畅．TMS320C6000 DSP 应用开发教程 [M]. 北京：机械工业出版社，2005.

[62] 孙鹤旭，林涛．嵌入式控制系统 [M]. 北京：清华大学出版社，2007.

[63] 王勇，王晓鸣，李文彬．基于双智能雷的目标跟踪方法研究 [J]. 探测与控制学报，2006 (2)：54-58.

[64] 伍家满．基于 FPGA 的细胞图像识别预处理的硬件研究 [D]. 南昌：南昌大学，2005.

[65] 吕宇，吴嗣亮．DSP＋FPGA 实时信号处理系统中 FPGA 设计的关键问题 [J]. 微计算机信息，2005，21 (5)：80-81.

[66] 高丽燕．基于 DSP＋FPGA 的图像识别系统设计与实现 [D]. 南京：南京理工大学，2006.

[67] 谌锋．基于 TMS320DM642 高速图像采集系统的软硬件设计 [D]. 南京：南京理工大学，2006.

[68] 赵建伟．基于 DM642 的最小数字图像采集系统的设计 [D]. 呼和浩特：内蒙古工业大学，2006.

[69] 任丽香，马淑芬，李方慧．TMS320C6000 系列 DSP 的原理与应用 [M]. 北京：电子工业出版社，2007.

[70] 刘扬．基于 DM642 的疲劳驾驶实时检测系统 [D]. 合肥：合肥工业大学，2007.

[71] Linda G. Shapior，George C. Stockman. Computer Vision [M]. 北京：机械工业出版社，2005.

[72] 飞思科技产品研发中心．MATLAB6. 5 辅助图像处理 [M]. 北京：电子工业出版社，2003.

[73] 王家文，曹宇．MATLAB6. 5 图形图像处理 [M]. 北京：国防工业出版社，2004.

[74] Milan Sonka，Vaclav Hlavac，Roger Boyle. 图像处理、分析与机器视觉 [M]. 北京：人民邮电出版社，2003.

[75] 张雄伟，陈亮，徐光辉．DSP 芯片的原理与开发应用 [M]. 北京：电子工业出版社，2003.

[76] Wesley E. Snyder，Hairong Qi. Maching Vision [M]. 北京：机械工业出版社，2005.

[77] 胡小峰，赵辉．Visual C＋＋/Matlab 图像处理与识别实用案例精选．北京：人民邮电出版社，2004.

[78] Yan D，Hongqing M，Jilin L，et al. A high Performance License Plate Recognition System Based On The Web Technique [C]. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems，2001. Proceedings. 2001：325-329.

[79] 孙即祥．模式识别中的特征提取与计算机视觉不变量 [M]. 北京：国防工业出版社，2001.

[80] 陈文．样本 [EB]. 百度百科，2008-5-8.

[81] 贾云得．机器视觉 [M]. 北京：科学出版社，2003.

[82] 张广军．机器视觉 [M]. 北京：科学出版社，2005.

[83] 高新杰，李德胜．基于比值法和模板匹配法的灰度图像拼接［J］．微计算机处理，2007，23（12）：277-279.

[84] 徐正光，田清，张利欣．图像拼接方法探讨［J］．微计算机信息，2006，22（10）：270-273.

[85] Chen S E. Quick time VR-An image-based approach to virtual environment navigation［J］. Computer Graphics，1995，20（8）：29-38.

[86] Walker K N，Cootes T F，Taylor C J. Automatically building appearance models from image sequences using salient features［J］. Image and Vision Computing，2002，20（3）：435-440.

[87] McLauchlan P F，Jaenicke A. Image mosaicing using sequential bundle adjustment［J］. Image and Vision Computing，2002，20（5）：751-759.

[88] 胡社教，江萍，陈宗海．基于序列图像的全景图像拼接［J］．合肥工业大学学报，2003，26（4）：525-528.

[89] 钟力，胡晓峰．重叠图像拼接算法［J］．中国图像图形学报，1998，3（5）：366-370.

[90] 张素，王小菊，徐乃平．一种基于小波分解的多图像拼接技术［J］．西北工业大学学报，2001，19（1）：23-27.

[91] 胡社教，陈宗海，刘年庆．基于向量匹配的全景图像拼接［C］//系统仿真技术及其应用（Vol. 4），合肥：中国科学技术大学出版社，2002：18-23.

[92] 漆驰，刘强，孙家广．摄像机图像序列的全景图拼接［J］．计算机辅助设计与图形学学报，2001，13（7）：605-609.

[93] 谭志标．高速公路收费系统中图像识别关键技术的研究［D］．广州：广东工业大学，2004：56-60.

[94] 阮秋琦．实用数字图像处理［M］．北京：电子工业出版社，2001.

[95] 崔屹．数字图像处理技术与应用［M］．北京：电子工业出版社，1997.

[96] 冈萨雷斯．数字图像处理（第二版，英文版）［M］．北京：电子工业出版社，2003.

[97] 谢凤英，赵丹培．Visual C＋＋数字图像处理［M］．北京：电子工业出版社，2008.

[98] 刘榴娣．实用数字图像处理［M］．北京：北京理工大学出版社，2001.

[99] 陈姗姗．数字图像处理与识别技术的应用研究［D］．北京：北京邮电大学，2006.

[100] 舒海燕．图像目标识别技术的研究与应用［D］．西安：西北工业大学，2002.

[101] 雷艳敏，黄秋元．基于数字形态学的图像边缘检测［J］．武汉理工大学学报，2005，27（5）：25-27.

[102] Robinson G. Edge detection by compass gradient masks［J］. Computer Graphics and Image Processing，1997，6（S）：492-501.

[103] Davis L. A survey of edge detection techniques［J］. Computer Graphics and Image Processing，2002，4（3）：248-252.

[104] Peli T，Malah D. A study of edge detection algorithms［J］. Computer Graphics and Image Processing，2004，20（1）：18-21.

[105] Canny J F. Find edges and lines in images. Technical Report AI-TR-720，Artifical Intelligence laboratory，Cambridge，MA，2003.

[106] 章毓晋．图像处理与分析［M］．北京：清华大学出版社，1999.

[107] 王兆峰．图像识别和边缘检测的若干研究 [D]. 杭州：浙江大学，2006：54-67.
[108] 孙栋．基于纹理分析的目标图像识别技术研究 [D]. 南京：南京理工大学，2005.
[109] 张晶．图像边缘检测算法的研究 [D]. 济南：山东大学，2006.
[110] 杨述斌．图像边缘检测技术概述 [J]. 武汉化工学院学报，2003 (1)：45-48.
[111] 王慧燕．图像边缘检测和图像匹配研究及应用 [D]. 杭州：浙江大学，2003.
[112] 吕同富，刘宝军．图像边缘提取简单算法及其应用 [J]. 计算机仿真，2007，20 (4)：99-102.
[113] 王磊．基于 Canny 理论的边缘提取改善算法 [J]. 中国图形图像学报，1996，3 (6)：191-195.
[114] Lam. L，Lee. S，Suen. C. Y. Thinning methodologies-a comprehensive survey [J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 1992，14 (9)：869-885.
[115] Guilherme N，DeSonza Avinash C. kar. Vision for mobile robot navigation：A survey [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence，2002，24 (2)：237-267.
[116] Juan Pavon，Jorge Gomez-Sanz. Development of intelligent multisensor surveillance system with agents [J]. Robotics and Autonomous Systems，2007，55：892-903.
[117] Jagannadan V，Prakash M C，Sarma R R. Feature extraction and image registration of color images using Fourier bases [J]. IEEE transactions on image processing，2005，2：657-662.
[118] Zhao Xiaochuan，Luo Qingsheng，Han Baoling. Survey on robot multi-sensor information fusion technology [C]. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation，2008：5014-5018.
[119] Tsair Y A. Versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses [J]. IEEE J. Robot. Autom. 1987，RA-3 (4)：323-344.
[120] Shih S W. When should we consider lens distortion in camera calibration [J]. Pattern Recognition. 1995，28 (3)：447-461.
[121] Bhosle Udehav，Chaudhuri Subhasis，Roy Sumantra Dutta. A fast method for image mosaicing using Geometric Hashing [J]. IETE Journal of Research，2002，48 (3)：317-324.
[122] Jiang Da-zhi. Research and overview of imaging non-linear distortion in computer vision [J]. Computer Engineering，2001，27 (12)：108-110.
[123] 于起峰．基于图像的精密测量与运动测量 [M]. 北京：科学出版社，2002.
[124] Asari K V. Technique of distortion correction in endoscopic images using a polynomial expansion [J]. Medical and Biological Engineering and Computing，1999，37 (1)：126-132.
[125] 王珂娜．一种基于神经网络的图像畸变校正方法 [J]. 中国图像图形学报，2005，10 (5)：603-607.
[126] 王权岱．压印对正系统中标记图像几何畸变的校正 [J]. 光学精密工程，2007，15 (3)：422-427.
[127] Anthony Remazeilles. Image-based robot navigation from an image memory [J]. Robotics and Autonomous System，2007，55：345-356.
[128] Bansal R. Using perturbation theory to compute the morphological similarity of diffusion tensors [J]. IEEE transactions on medical imaging. 2008，27 (5)：589-607.

[129] 朱均超，刘铁根，刘德瑞，邓集杰，柳森．一种线阵CCD图像灰度分布快速校正方法［J］. 光电工程，2007，34（12）：108-112.

[130] Kannala Juho. A Generic Camera Model and Calibration Method for Conventional，Wide-Angle and Fish-Eye Lenses ［J］. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence，2006，28（8）：1335-1340.

[131] 王伟，钟堰利，吴建坤．广角镜头图像校正系统的研究［J］. 光学技术，2004，30（4）：489-490.

[132] 王占斌，赵辉，陶卫，唐燕．广角镜头桶形畸变的样条函数修正方法［J］. 光电工程，2008，35（4）：140-144.

[133] Kyriakoulis Nikolaos，Gasteratos Antonnios，Amanatiadis Anglos. Comparison of data fusion techniques for robot navigation ［J］. Lecture Notes in Computer Science. 2006，26：547-550.

[134] Misel Brezak. Robust and accurate global vision system for real-time tracking of multiple mobile robots ［J］. Robotics and Autonomous System，2008，56（3）：213-230.

[135] Gonzalez R C. Digital Image Processing-Second Edition ［M］. 北京：电子工业出版社，2006.

[136] 郑南宁．计算机视觉与模式识别［M］. 北京：国防工业出版社，1998.

[137] Danica Kragic，Henric I Christensen. Survey on Visual Servoing for Manipulation ［EB/OL］. http：//citeseer. ist. psu. edu/484743. html.

[138] 崔星．基于视觉的移动机器人跟踪导航研究［D］. 北京：北京理工大学，2007.

[139] Xu L，Oja E. Randomized Hough transform（RHT）：basic mechanisms，algorithms，and computational complexities ［J］. CVGIP：Image understanding，1993，57（2）：131-154.

[140] Xu L，Oja E，Kultanan P. A new curve detection method：rangomized hough transform（RHT）［J］. Pattern recognition letters，1990，11（5）：331-338.

[141] Qiang Ji，Robert M Haralick. Error propagation for the Hough transform. Pattern Recognition Letters，2001（22）：813-823.

[142] 蔡晋辉，蒋庆．圆检测Hough变换的改进算法研究［J］. 模式识别与人工智能，2004（17）：72-76.

[143] 孙亦男．一种基于圆检测的改进Hough变换算法研究［J］. 计算机工程及应用，2003（20）：103-105.

[144] 王强，胡建平，胡凯，等．一种用于圆检测的快速Hough变换算法［J］. 微型计算机系统，2000：970-973.

[145] 林金龙，石青云．用Hough变换实现圆检测的方法［J］. 计算机工程，2003（11）：17-18.

[146] Teh-Chuan Chen，Kuo-Liang Chuan. An Efficient Randomized Algorithm for Detection Circles ［J］. Computer Vision and Image Understanding，2001：172-191.

[147] 夏德深．现代图像处理技术及其应用［M］. 南京：东南大学出版社，1996：68-75.